

เอกสารประกอบการสอน  
รายวิชา 431309 Foundry Engineering

อ. สาร์นัท บุญมี

(ใช้ควบคู่กับหนังสือวิศวกรรมหล่อเหล็ก โดย ศาสตราจารย์ มนัส สติรจินดา)

# บทที่ 1 ทรายแบบหล่อและสมบัติ (Molding Sand and Its Properties)

## ทราย

- ปกติใช้ร่วมกับ binder ในการทำแบบ
- แบ่งออกเป็น
  - Silica sand
  - Chromite sand
  - Zircon sand
  - Olivine sand
  - Aluminium Silicate



## Silica sand

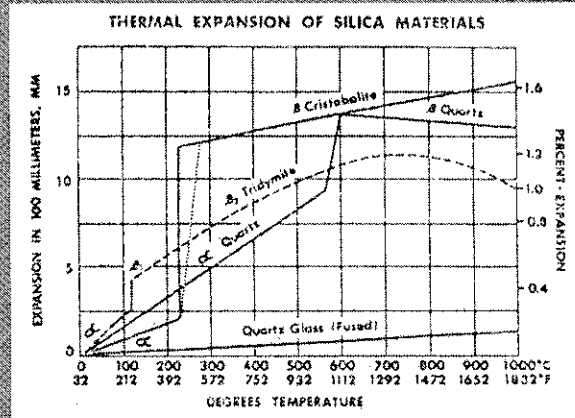
- มีชื่อไทยเรียกว่า "ทรายแก้ว"
- $\text{SiO}_2 > 90\%$  ขึ้นไป
- จุดหลอมตัว  $1700^\circ\text{C}$
- สีขาว
- Specific gravity = 2.5 - 2.8
- 5 - 5.5 Mohr Hardness
- การเจือปนได้แก่  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , lime, Alkaline ทำให้จุดหลอมตัวต่ำลง

## Silica sand

- ส่วนผสมทั่วไป เช่น
  - $\text{SiO}_2$  89.4%
  - $\text{Al}_2\text{O}_3$  4.07%
  - $\text{Fe}_2\text{O}_3$  2.04%
  - $\text{TiO}_2$  0.19%
  - $\text{CaO}$  0.75%
  - $\text{MgO}$  0.55%
  - $\text{Na}_2\text{O}$  0.28%
  - $\text{K}_2\text{O}$  1.10%
  - Volatile matter 1.62%

## Silica sand

- เกิดการเปลี่ยนแปลงจาก  $\alpha$  ไปเป็น  $\beta$  ที่ช่วง  $500 - 600^\circ\text{C}$  ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรมากและขยายตัวสู่อ่างทำให้เกิดความเสียหายต่อวงหล่อ



## Chromite sand

- สีดำ
- $\text{FeO} \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3$
- Specific gravity = 4.3 - 4.6
- 5.5 - 7 Mohr Hardness
- อัตราการขยายตัวต่ำ
- Thermal Conductivity ต่ำ
- จุดหลอมตัว  $1760 - 1980^\circ\text{C}$

### Chromite sand

- เป็น slag จากการถลุงเฟอร์ไรโครเมียม
- แหล่งทรายได้แก่ ออฟริกาใต้, อินโดนีเซีย
- ตัวอย่างส่วนผสม เช่น

■ $Cr_2O_3$	45.8%
■ $Al_2O_3$	21.34%
■ $Fe_2O_3$	19.50%
■ $MgO$	8.75%
■ $SiO_2$	1.34%
■ $CaO$	0.94%
■ $H_2O$	0.03%

### Chromite sand

- โลหะหลอมเหลวส่วนใหญ่จะมี Wettability ต่อ Chromite sand ต่ำกว่า Silica sand ทำให้เหมาะสมกว่าที่จะนำมาใช้ทำผิวหน้าโพรงแบบ เรียกว่า "Facing sand"
- Chromite sand ตามธรรมชาติมักจะมี  $Fe_2O_3$  ปนอยู่สูงทำให้จุดหลอมตัวต่ำ ต้องนำมาแต่ง ทำความสะอาด คัดขนาด ทำให้ราคาแพง



## Zircon sand

- สีขาว - เหลือง - น้ำตาลอ่อน
- $ZrSiO_4$
- Specific gravity = 4.4 - 4.7
- 7 - 7.5 Mohr Hardness
- อัตราการขยายตัวต่ำมาก (ต่ำกว่า Chromite sand)
- จุดหลอมตัว 2038 - 2200 °C

## Zircon sand

- พบตามแหล่งแร่ดีบุก ปนอยู่กับทังสเตน
- ในไทยเคยมีแหล่งแร่ดีบุกมากทางภาคใต้ แต่ไม่ได้มีการนำมาใช้ ปัจจุบันไม่มีแล้ว
- ปัจจุบันนำเข้ามาจากออสเตรเลีย
- ตัวอย่างส่วนผสม
  - $ZrO_2$  66.5%
  - $SiO_2$  33.01%
  - $Fe_2O_3$  0.02%
  - $TiO_2$  0.14%

## Olivine sand

- $(\text{Mg,Fe})_2\text{-SiO}_4$
- สีเขียวปนเทา
- Specific gravity = 3.2 – 3.6
- 6.5 – 7 Mohr Hardness
- อัตราการขยายตัวปานกลาง
- จุดหลอมตัว 1538 – 1760 °C

## Olivine sand

- พบมากใน Norway ไทยไม่มี
- ตัวอย่างส่วนผสม
  - MgO 49.4%
  - $\text{SiO}_2$  41.2%
  - $\text{Al}_2\text{O}_3$  1.8%
  - $\text{Fe}_2\text{O}_3$  7.1%
  - CaO 0.2%



## Aluminium Silicate

- สีน้ำตาลอ่อน
- $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$
- Specific gravity = 3.5
- 6 Mohr Hardness
- อัตราการขยายตัวสูงกว่า Chromite และ Zircon sand
- Thermal conductivity สูง
- จุดหลอมตัว  $1849^\circ\text{C}$

## Aluminium Silicate

- พบตามธรรมชาติ มีมากในสหรัฐอเมริกา ฟลอริดา
- ตัวอย่างส่วนผสม
  - $\text{Al}_2\text{O}_3$  50.0%
  - $\text{SiO}_2$  43.0%
  - $\text{ZrO}_2$  5.0%
  - $\text{Fe}_2\text{O}_3$  1.0%
  - $\text{TiO}_2$  1.0%

## Binder

- เป็นส่วนผสมทำหน้าที่ประสานทรายแบบไว้ด้วยกันให้คงรูปร่างเป็นโพรงแบบได้
- มีหลายประเภทได้แก่
  - Clay
  - Sodium Silicate
  - Resin

## Clay

- แบ่งออกเป็น 3 ประเภท
  - Kaolinite หรืออีกชื่อหนึ่งคือ China Clay เป็นดินสีขาว ทนความร้อนสูง ความเหนียวน้อย นิยมใช้ทำเครื่องปั้นดินเผา ใช้ทำแบบหล่อเนื้อ
  - Ball Clay คล้าย Kaolinite แต่เหนียวและแข็งแรงกว่าทำให้มี Dry Strength และ Hot Strength สูงกว่า
  - Bentonite Clay ใช้กันมากที่สุดในอุตสาหกรรมหล่อโลหะ

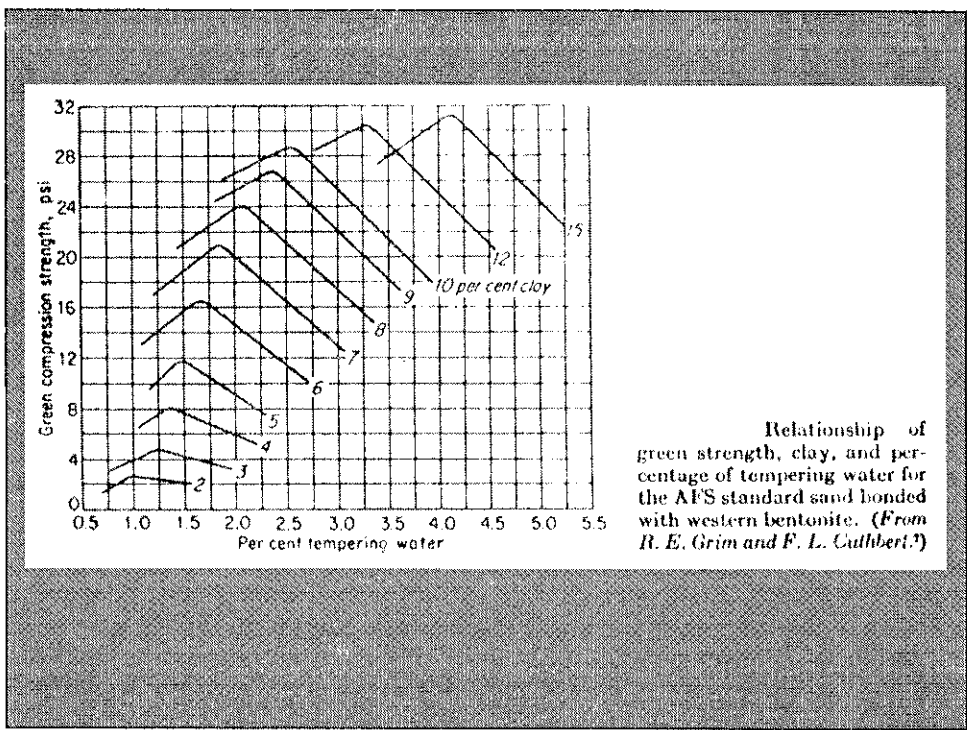
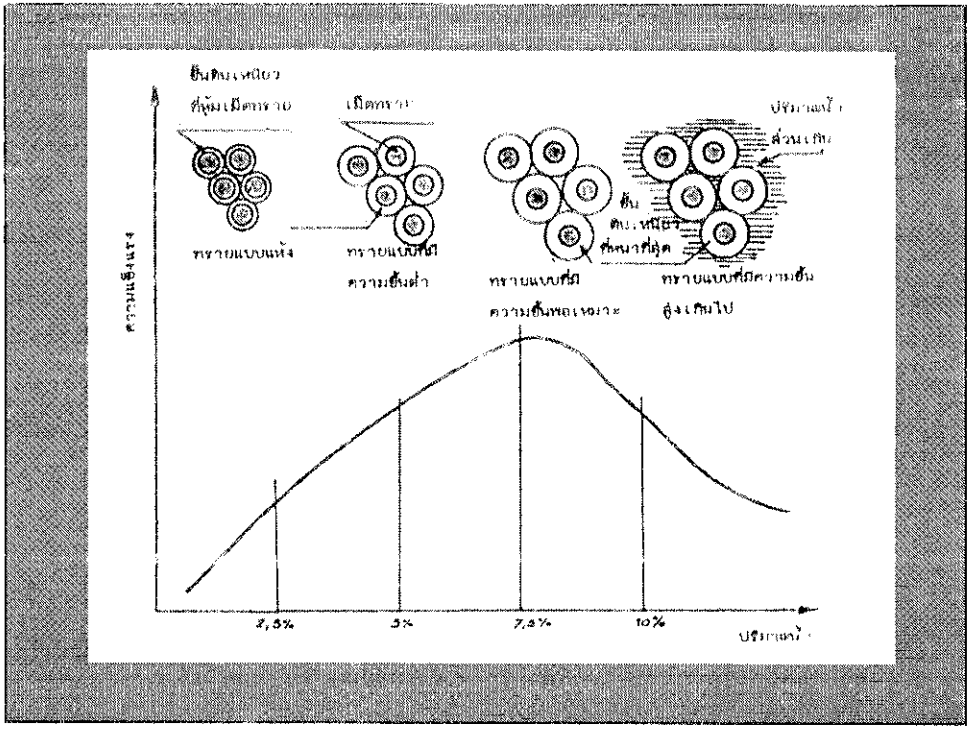
## Bentonite

- เกิดจากการสลายตัวของเปลือกเขาไฟ มีมากในประเทศสหรัฐอเมริกา แอฟริกาและออสเตรเลีย
- $Al_2O_3 \cdot 4SiO_2$
- มีความเหนียวสูงมากเพราะดูดซับน้ำได้และขยายตัวมาก
- มี 2 ประเภทได้แก่ Na base และ Ca base
- Na base ดีกว่า Ca base พบที่เดียวที่ Wyoming USA

## Bentonite

- Bentonite จะประสานเม็ดทรายเข้าไว้ด้วยกัน ได้ต้องมีน้ำผสมอยู่ด้วย
- การมีพืชน้ำอยู่ทำให้เรียกว่า "Green Sand"
- ปริมาณน้ำที่น้อยเกินไปทำให้ผสมไม่ทั่วถึง ได้ความแข็งแรงต่ำ
- ปริมาณน้ำมากเกินไปกลายเป็นส่วนเกินทำให้ความแข็งแรงต่ำ และ ความชื้นที่มากเกินไปทำให้เกิดไอน้ำมาก
- ส่วนใหญ่ใช้ประมาณ 4 - 8% ขึ้นอยู่กับปริมาณ bentonite

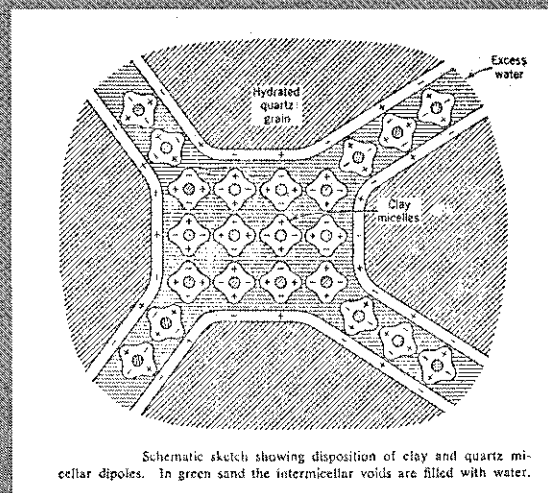




## แรงยึดเหนี่ยวจาก Bentonite

- Electrostatic force
- Capillary force
- Interparticle friction

### Electrostatic force





## Na silicate

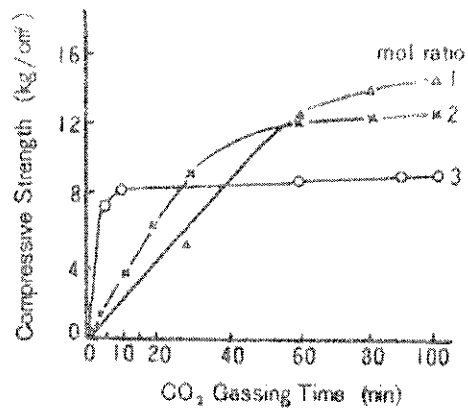
- โซเดียมซิลิเกตเป็นของแข็งใสเหมือนแก้ว เมื่อนำไปใช้จะผสมกับไอน้ำ ได้ของเหลวที่มีสีขาวขุ่น หนืด บางแห่งเรียกว่า "น้ำแก้ว"
- ต้องให้แก๊ส  $\text{CO}_2$  จึงจะทำให้มีความแข็งแรง ได้ความแข็งแรงสูงมาก เหมาะสำหรับใช้หล่อเหล็กกล้า
- ความหนืดขึ้นอยู่กับ mol ratio ระหว่าง  $\text{SiO}_2$  และ  $\text{Na}_2\text{O}$  ส่วนใหญ่มีค่าระหว่าง 1.5 - 3
- นำกลับมาใช้ใหม่ยาก ส่วนใหญ่นำไปถมที่

## Na silicate

- ปฏิกิริยาที่ทำให้โซเดียมซิลิเกตแข็งตัวคือ



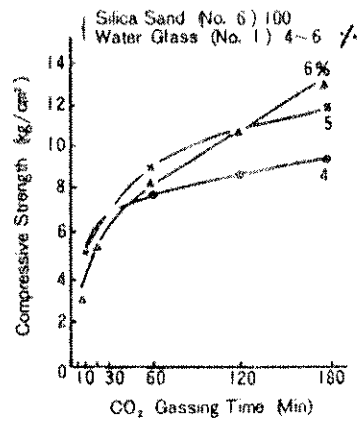
- m คือ mol ratio ของ โซเดียมซิลิเกต



Relations Among Mol ratio of Water Glass, Gassing Time & Compressive Strength

### Na silicate

- mol ratio ที่ใช้ส่วนใหญ่เท่ากับ 2.0 ถึง 2.5
- ถ้า mol ratio มากเกินไปได้ Compressive strength ต่ำ
- ถ้า mol ratio ต่ำเกินไปใช้เวลานาน เปลือง CO<sub>2</sub>



Relations Between Adding Volume of Water Glass and Compressive Strength

- ปริมาณโซเดียมซิลิเกตที่ใช้ทั่วไปจะมีค่าประมาณ 4 – 6 %
- ถ้ามากเกินไปจะทำให้รื้อแบบได้ยาก

### Furan Resin

- ที่นิยมใช้มากที่สุดคือ Furan resin ซึ่งเป็น Thermosetting
- เป็นของเหลวผสมระหว่างฟูริลฟอรันดีไฮด์ได้จากปิโตรเลียมกับ Furfuryl alcohol ( $C_4H_4OCH_2OH$ ) ซึ่งเป็นแอลกอฮอล์ที่ได้จากผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร เช่น ข้าวโพด
- Furan resin เมื่อผสมแล้วจะเป็นของเหลวสีเหลืองขึ้น ถ้าออกกษอด์มากจะค่อนข้างทึบสีน้ำตาล มีกลิ่นเหม็น
- เมื่อนำ Hardener (Phosphoric acid) ผสมกับทรายแบบแล้วเติม resin ลงไปจะเกิด Polymerization ได้ความแข็งแรง



## Furan Resin

- ถ้าใช้หล่อเหล็กกล้าซึ่งมีจุดหลอมตัวสูงจะทำให้เกิด N<sub>2</sub> ซึ่งทำให้เกิดรูพรุนในงานหล่อได้ จึงไม่นิยม จะเปลี่ยนไปใช้ Phenolic resin แทน
- การนำทรายแบบหล่อกลับมาใช้ใหม่ต้องนำไปเผาไล่ resin ออกให้หมด เรียกว่ากระบวนการ Reclaiming
- ราคาแพง
- Bentonite < Na silicate < Furan resin < Phenolic resin

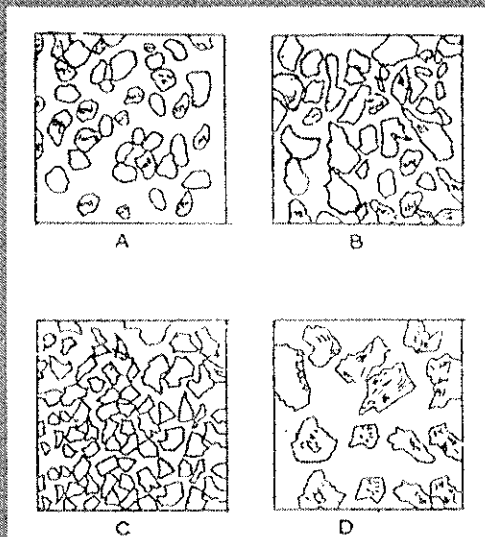
## สมบัติทรายแบบหล่อ

- Permeability
- Green Strength
- Dry Strength
- Hot Strength
- Collapsibility
- Thermal Stability
- Refractoriness
- Flowability

## Permeability

- เป็นความสามารถในการซึมของแก๊สผ่านทรายแบบ
- แก๊สจะละลายในโลหะหลอมเหลวได้ดีกว่าโลหะแข็งตัว ดังนั้นเมื่อโลหะแข็งตัวแก๊สจะแยกเฟสออกมา
- โดยทั่วไปจะเจาะรูไฮที่ทรายแบบช่วยระบายแก๊ส
- ทรายแบบที่ดีต้องยอมให้แก๊สแพร่ผ่านออกไปได้ จะช่วยลดปัญหาพอรันที่เกิดจากแก๊ส (pin hole & blow hole)

## รูปร่างของทรายแบบ



ทรายเม็ดกลม

Permeability มาก

Flowability สูง

Green Strength น้อย

Collapsibility มาก

ประหยัด Bentonite



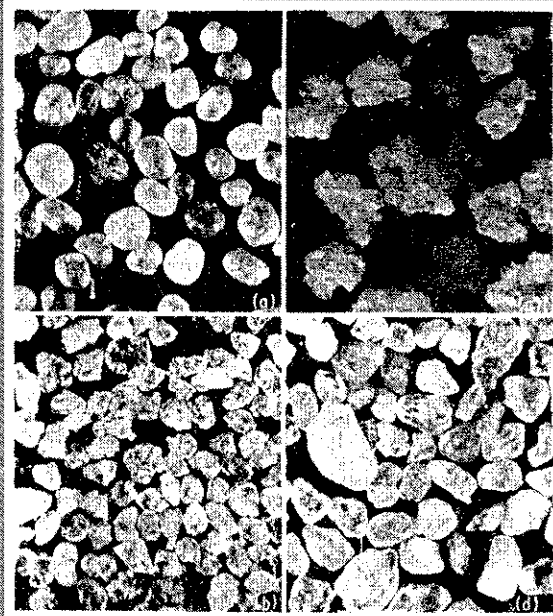
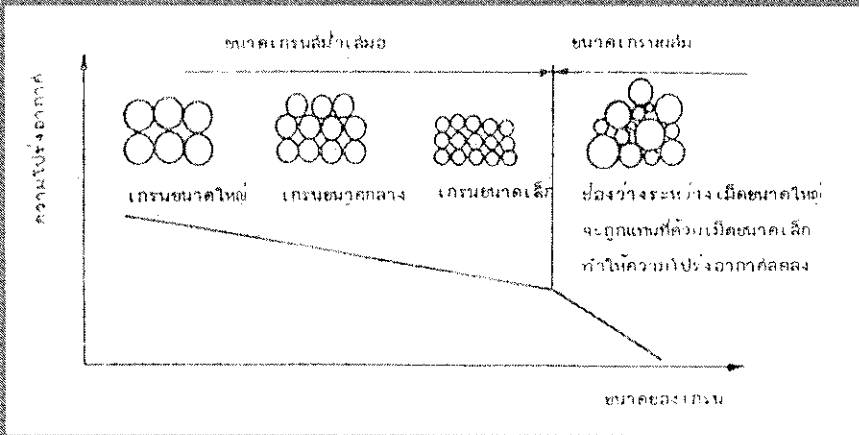


Fig. 5.1 Sand grain shapes. (a) Rounded sand grains, (b) angular sand grains, (c) compounded sand grains, (d) subangular sand grains. (Source: AFS)

### ขนาดของทรายแบบ



ทรายเม็ดเล็ก Permeability ต่ำ Green Strength สูง Flowability ต่ำ  
 เปรียบเทียบกับ Bentonite

## Green Strength

- หลังจากผสมทรายแบบกับ binder แล้ว จะเติมน้ำให้ทรายมีแรงยึดเหนี่ยว
- ทรายแบบต้องมีความแข็งแรงในขณะที่ยังไม่แห้ง เพื่อที่จะทำให้สามารถถอดแบบ หรือเคลื่อนย้ายแบบได้ โดยไม่พังหรือบิดเบี้ยว

## Dry Strength

- หลังจากทำแบบเสร็จแล้วจะทำการเผาแบบเพื่อไล่น้ำออก ไม่เช่นนั้นน้ำจะกลายเป็นไอฝังอยู่ในงานหล่อ
- หลังจากเผาไล่น้ำจนแห้งแล้ว ทรายแบบต้องยังคงความแข็งแรงไว้ เพื่อที่จะสามารถรับแรงดันและกรวดเศษจากน้ำโลหะ โดยไม่หลุดเข้าไปฝังตัวในงานหล่อ

## Hot Strength

- ทราขายแบบต้องมีความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูง (มากกว่า 120 C) เนื่องจากเมื่อสัมผัสกับน้ำโลหะแล้วจะต้องรองรับน้ำหนักของน้ำโลหะและตัวแบบเองไปตลอดช่วงการแข็งตัว
- ถ้าความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูงต่ำจะทำให้ทราขายแบบทั้งและน้ำโลหะไหลออกมา เป็นอันตรายโดยเฉพาะงานหล่อขนาดใหญ่

## Collapsibility

- หลังจากโลหะแข็งตัวหมดแล้ว ต้องรื้อทราขายแบบออก ทราขายแบบที่ต้องรื้อแบบได้ง่าย คือมีความแข็งแรงต่ำ
- นอกจากนี้ทราขายแบบต้องไม่ไปด้านการหดตัวของโลหะ ไม่เช่นนั้นอาจเกิด Hot tear
- Collapsibility
  - Bentonite > Resin > Na silicate



## Thermal Stability

- เมื่อทรายแบบบได้รับความร้อนจากน้ำโลหะจะเกิดการขยายตัว
- ทรายแบบบที่ดีต้องมีอัตราขยายตัวต่ำ
- ถ้ามีอัตราขยายตัวสูง อาจเกิดการโก่งงอ หรือ แตกหลุดลอกออกมา ไปฝังในชิ้นงาน เรียกว่า "Sand inclusion"
- วิธีแก้ อาจเติม Additive เช่น ผงซีลีอีย เมื่อโดนความร้อนจะเผาไหม้เกิดเป็นช่องว่างให้ทรายขยายตัวได้

## Refractoriness

- ทรายแบบบหล่อจะต้องทนต่อความร้อน คือมีจุดหลอมตัวสูง ซึ่งจะทำให้ใช้หล่อโลหะที่มีจุดหลอมสูงได้เช่นกัน เช่น Cast steel, High alloy steel
- ถ้าทรายแบบบหล่อไม่ทนต่อความร้อนจะละลายประสานติดแน่นกับงานหล่อ ซึ่งทำให้กัดถึง ไซ กัด เจะ เจือม ได้ยาก ต้องนำกลับไปหลอมใหม่

## Flowability

- ถ้าทรายมีความเสียดทานระหว่างเม็ดมากจะทำให้ไหลตัวไปตาม Pattern ได้ยาก และต้องใช้แรงมาก
- ทรายแบบที่ดีต้องมี Flowability สูง ซึ่งจะทำให้ตักแบบได้ง่าย และได้รับความแข็งแรงสม่ำเสมอ ใช้แรงน้อย
- Flowability ขึ้นอยู่กับขนาดและรูปร่างของทราย คือควรจะไม่เล็กเกินไปและมีรูปร่างกลม
- อาจเติม Graphite เพื่อเพิ่ม Flowability ช่วยลด Interparticle friction

## Special Additives

- นอกจากทรายแบบและ Binder แล้ว อาจใช้สารเติมเพื่อเพิ่มสมบัติของทรายแบบ
- ผง Cereal คือแป้งข้าวโพดหรือผงถั่วที่ทำจากกระดูกสัตว์ ช่วยเพิ่ม Green & Dry Strength และ Collapsibility
- Ground Pitch เป็นสารที่ได้จากการเผาถ่าน Coke ที่ 180 C ช่วยเพิ่ม Hot Strength และเพิ่มความเรียบผิวของงานหล่อ ผสมไม่เกิน 2%

## Special Additives

- ผง Sea Coal คือผงถ่านหินที่ละเอียดมาก ๆ ช่วยเพิ่ม Flowability, Collapsibility และปรับปรุงผิวให้เรียบขึ้น ผสมประมาณ 2 – 8%
- ผง Wood flour หรือขี้เถ้าช่วยเพิ่ม Thermal Stability ผสมประมาณ 0.5 – 2%
- ผง Silica flour ช่วยเพิ่ม Hot Strength ผสมประมาณ 3 – 5%
- ผง  $Fe_2O_3$  ช่วยเพิ่ม Hot Strength ใช้ไม่เกิน 1%

## Special Additives

- ผง Aluminium Silicate ช่วยเพิ่ม Thermal Stability ใช้ไม่เกิน 1.5%
- Molasses คือกากน้ำตาล ช่วยเพิ่ม Dry Strength ใช้ไม่เกิน 2% หลังเผาแบบแห้งต้องรีบเททันทีเพราะกากน้ำตาลจะดูดความชื้น ถ้าทิ้งไว้นาน ทำให้เกิด Sweating
- Fuel Oil ใช้แทนน้ำเพื่อลดปริมาณน้ำและให้ความร้อนแก่ น้ำ โลหะ ทำให้มีความหนืดต่ำ



## บทที่ 2 การทดสอบสมบัติของทรายแบบ (Molding Sand Testing)

### การทดสอบสมบัติของทรายแบบ

- ◆ การหาปริมาณน้ำ (Moisture content)
- ◆ การทดสอบความโปร่งอากาศ (Permeability test)
- ◆ การทดสอบความแข็งแรงของทราย (Sand Strength test)
- ◆ การทดสอบหาปริมาณดินเหนียว (Clay Content test)
- ◆ การวัดหาความละเอียดของเม็ดทราย (Fineness test)
- ◆ การวัดความแข็งของผิวแบบ (Surface Hardness test)

## Moisture Content

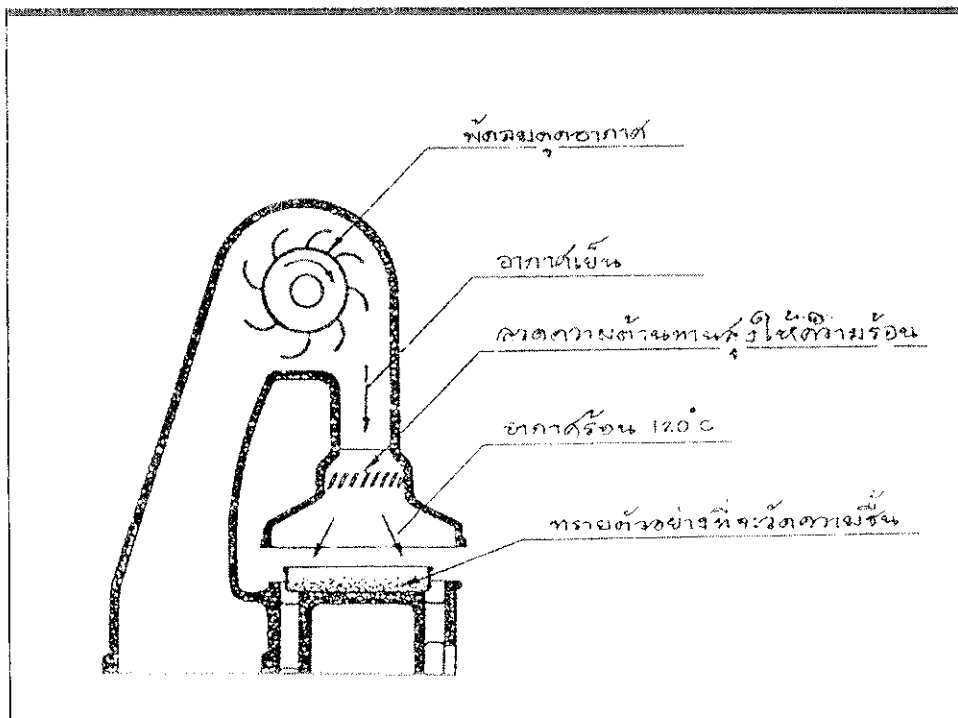
- ◆ ชั่งทรายตัวอย่าง 50 g นำไปอบที่ 120 °C 15 นาที
- ◆ นำไปชั่ง น้ำหนักที่หายไปคือน้ำหนักของน้ำในทรายแบบ
- ◆ ทำเป็น % โดยการคูณ 2
- ◆ เครื่อง Moisture teller มีพัดลมดูดอากาศ และเคลวาคให้ความร้อนตั้งเวลาได้ (15 นาที)

## Moisture Content

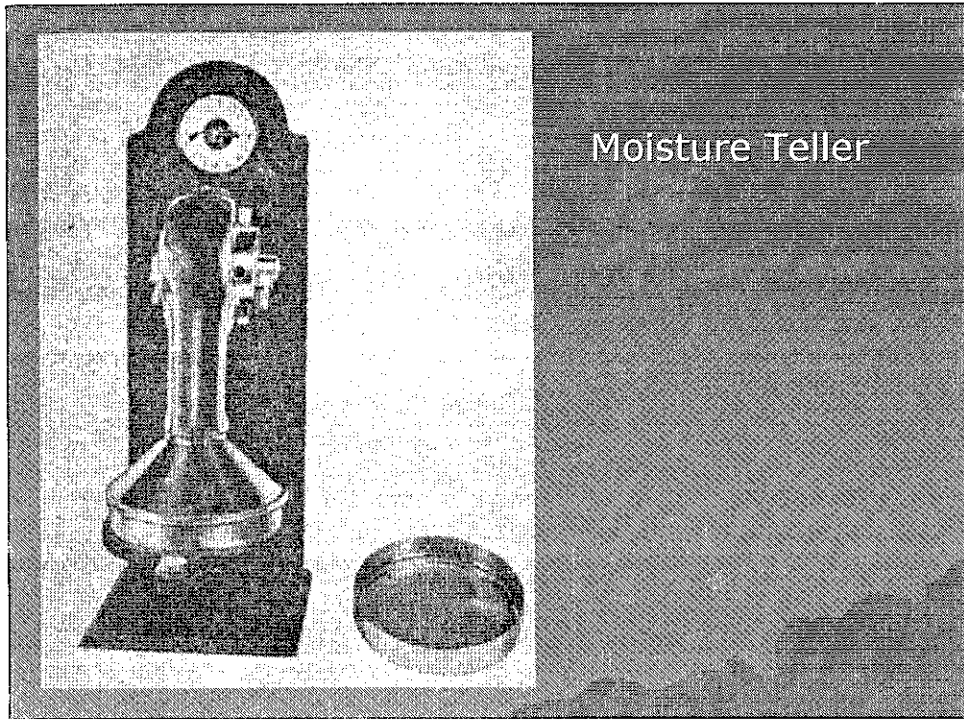
- ◆ อีกวิธีหนึ่งคือผสมแคลเซียมคาร์ไบด์ ซึ่งจะทำปฏิกิริยากับน้ำให้เกิด Acetylene ปริมาณแก๊สจะขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำ
- ◆ เกิดความคลาดเคลื่อนได้ง่าย ขึ้นอยู่กับสารผสมแคลเซียมคาร์ไบด์อย่างทั่วถึงหรือไม่
- ◆ ควรทำ Calibration ทุกครั้งโดยการทดลองวัดจากทรายที่ทราบปริมาณน้ำอยู่แล้วก่อนแล้วนำผลไปเทียบ

## Permeability Test

- ◆ ความโปร่งอากาศขึ้นอยู่กับ ขนาดและรูปร่างของเม็ดทราย, ปริมาณน้ำ, ปริมาณ bentonite, ปริมาณ additive, แรงดันที่ใช้อัดทรายแบบจึงต้องควบคุมตัวแปรให้คงที่
- ◆ วิธีการทดสอบตามมาตรฐาน AFS คือใช้ทรายบรรจุลงในกระบอกมาตรฐานเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 นิ้ว (5.08 ซม) ใช้ Ramming อัดด้วยแรง 14 ปอนด์ โดยยก Rammer สูงขึ้น 2 นิ้วจากระดับทรายแล้วปล่อยให้ตกกระทบบนทราย 3 ครั้ง







### Permeability Test

- ◆ หลังจากอัดแล้วจะต้องได้ทรายทรงกระบอกสูง  $2 \pm 1/32$  นิ้ว ถ้าไม่ได้ให้นำทรายใหม่มาอัดใหม่
- ◆ นำทรายที่ได้ไปวัดความโปร่งอากาศ
- ◆ กำหนดให้ใช้อากาศ  $2000 \text{ cm}^3$  ไหลผ่านด้วยความดันคงที่  $98 \text{ N/cm}^2$
- ◆ วัดเวลาที่อากาศทั้งหมดไหลผ่าน

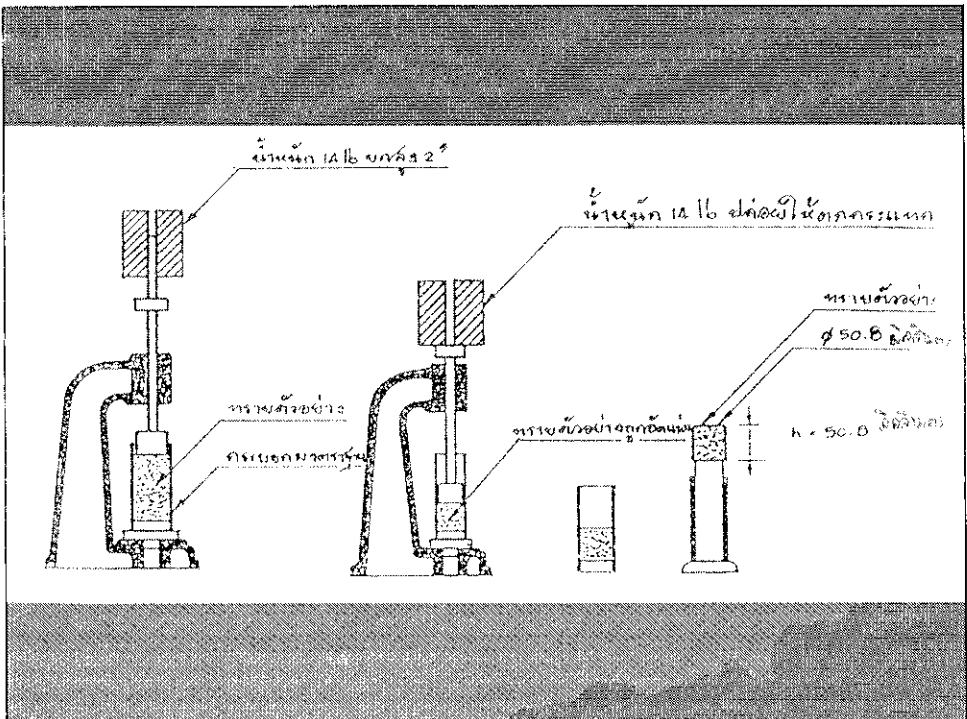
$$\frac{V}{l} \propto \frac{k_D A \Delta P^2}{L}$$

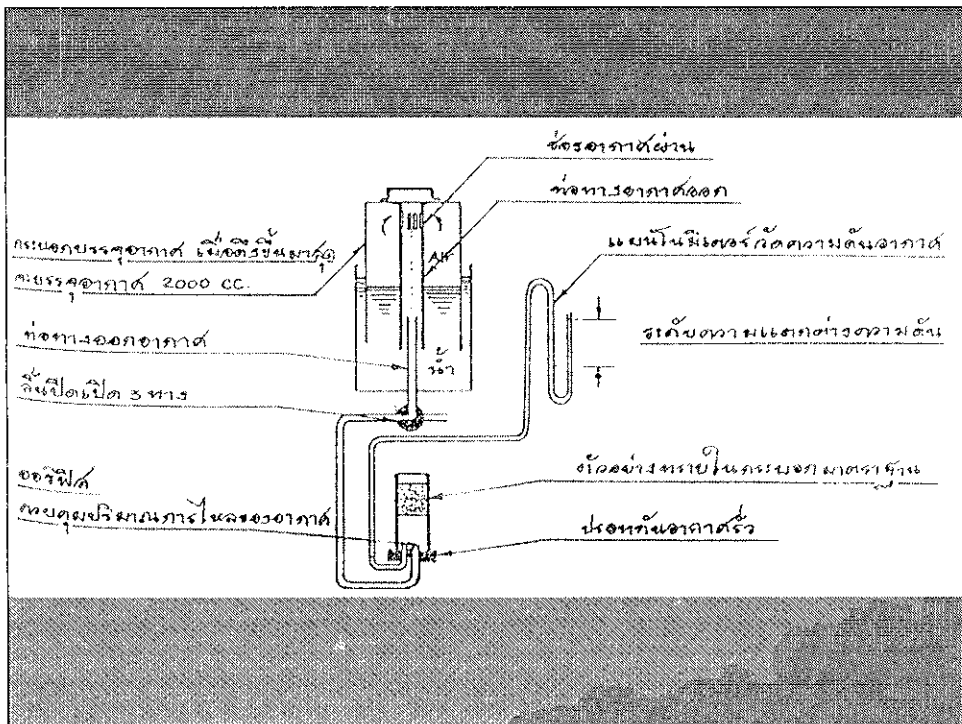
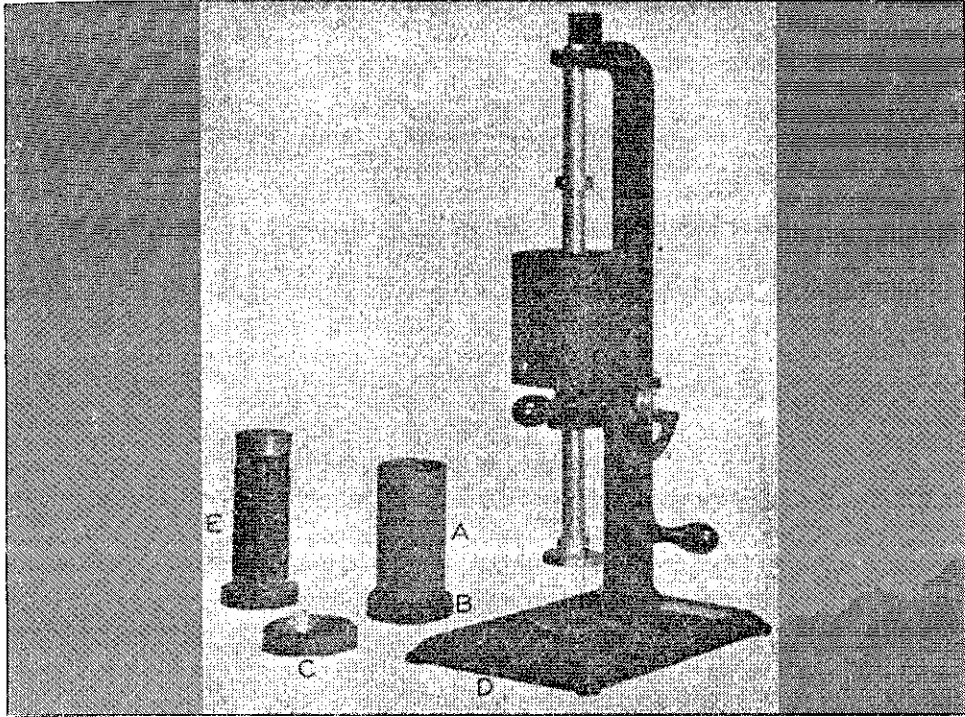
$$\frac{V}{k_D} \propto \frac{A \Delta P^2}{VL}$$

$$\frac{Ns}{m^4} \propto \frac{(m^2) \left( \frac{N}{m^2} \right) s}{(m^3) m}$$

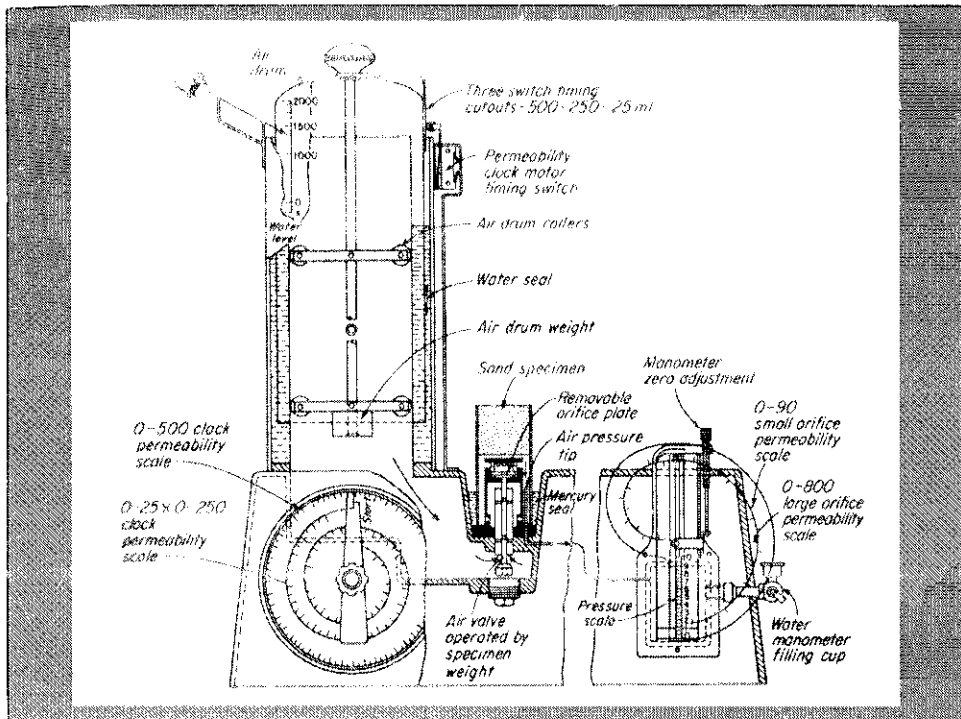
$$k_D \propto \frac{m^4}{Ns}$$

$P = 98 \text{ N/cm}^2$   
 $L = 2 \times 2.54 = 5.08 \text{ cm}$   
 $V = 2000 \text{ cm}^3$   
 $A = (3.14/4) \times (2 \times 2.54)^2$   
 $t = \text{วัด!!!}$









## Sand Strength Test

### ◆ มี 3 แบบ คือ

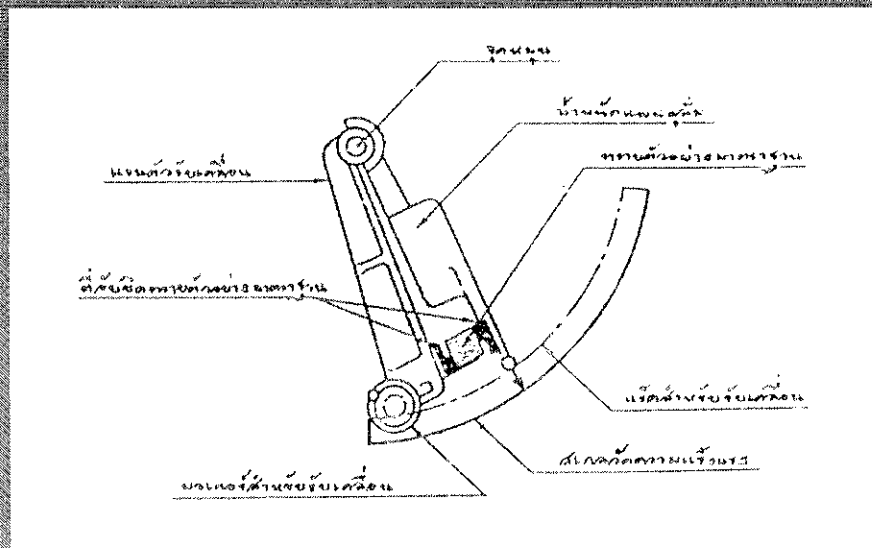
- Tensile Strength
- Compressive Strength
- Shear Strength

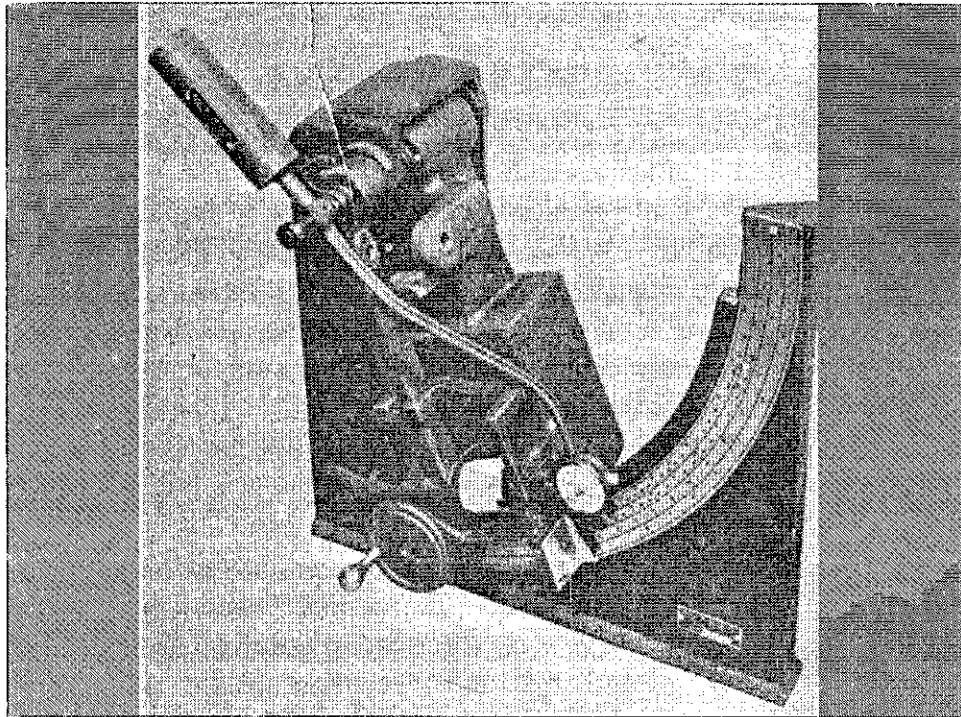
◆ ส่วนใหญ่จะวัด Compressive Strength มากที่สุด เนื่องจากทรายแบบจะต้องรองรับน้ำหนักของน้ำ โลหะและของตัวเองในรูปแบบแรงอัดมากที่สุด

## Sand Strength Test

- ◆ นำทรายแบบขนาดมาตรฐาน บรรจุบน Universal sand strength machine
- ◆ แขนของเครื่องจะถูกยกขึ้นไปตามเฟลม เมื่อถูกยกสูงขึ้นจะทำให้ องศาของแรงจากน้ำหนักที่กระทำต่อทรายเปลี่ยนไป ทำให้แรงอัดสูงขึ้น
- ◆ เมื่อแรงอัดมากพอจนทำให้ทรายแบบแตก อ่านค่าบนสเกล โดยจะมีแม่เหล็กเป็นตัวชี้

## Sand Strength Test

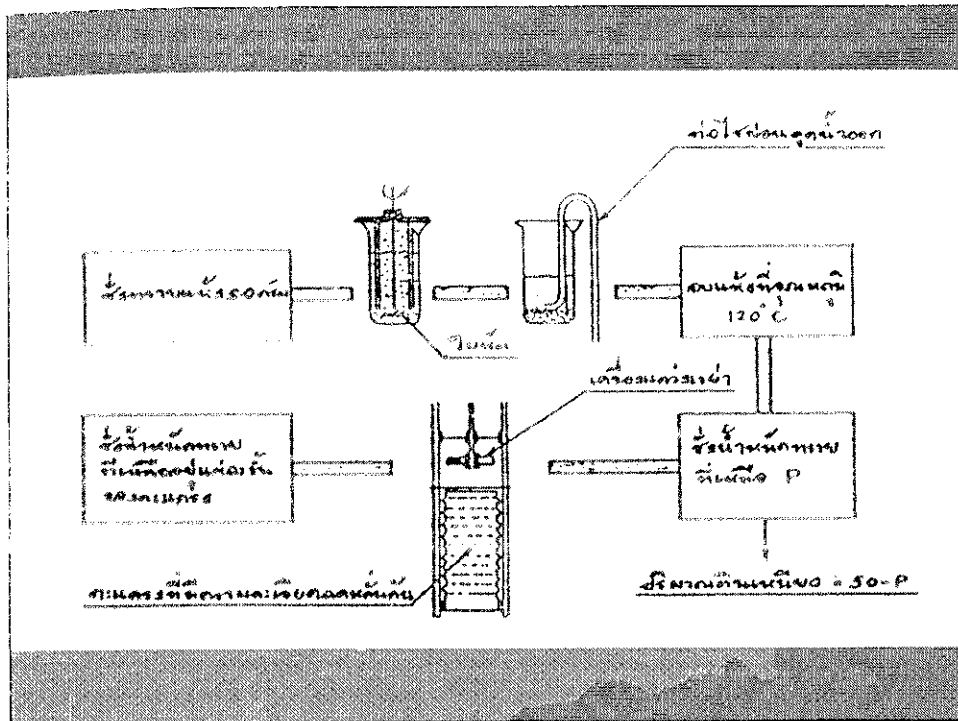




### Clay Content Test

- ◆ ตามวิธีการวัดของ AFS ถือว่า Clay คืออนุภาคที่มีขนาดเล็กลงกว่า 20 ไมครอน
- ◆ ชั่งทรายแห้ง 50 g ผสมกับน้ำกลั่น 475 g และ 3% NaOH 25 cm<sup>3</sup>
- ◆ กวนและปล่อยให้ตกตะกอน แล้วดูดน้ำผสม Clay ออก แล้วเติมน้ำลงไปใหม่ แล้วปล่อยให้ตกตะกอนอีก ดูดน้ำออกอีก ทำไปเรื่อยๆ จนน้ำใส
- ◆ นำทรายไปอบแห้ง แล้วชั่งน้ำหนัก
- ◆ น้ำหนักที่หายไปคือ Clay Content
- ◆ ถ้าต้องการทำเป็น % ให้คูณ 2





### Fineness Test

- ◆ หลังจากการหา Clay Content นำทรายแห้งที่ได้ ไปใส่ตะแกรงร่อน (Sieve Analysis) ตามมาตรฐานใช้ตะแกรง 11 ชั้น มี mesh number ได้แก่ 6, 12, 20, 30, 40, 50, 70, 100, 140, 200, 270
- ◆ Mesh number คือจำนวนช่องของตะแกรงในระยะ 1 นิ้ว

Mesh Number	Opening (mm)
6	3.327
12	1.651
20	0.833
30	0.589
40	0.414
50	0.295
70	0.208
100	0.147
140	0.104
200	0.074
270	0.053

Mesh number	Percent Retained	Multiplier	Product
6	0	3	0
12	0	5	0
20	0	10	0
30	2.0	20	40
40	2.5	30	75
50	3.0	40	120
70	6.0	50	300
100	20.0	70	1400
140	32.0	100	3200
200	12.0	140	1680
270	9.0	200	1800
Pan	4.0	300	1200
714	90.5		9815

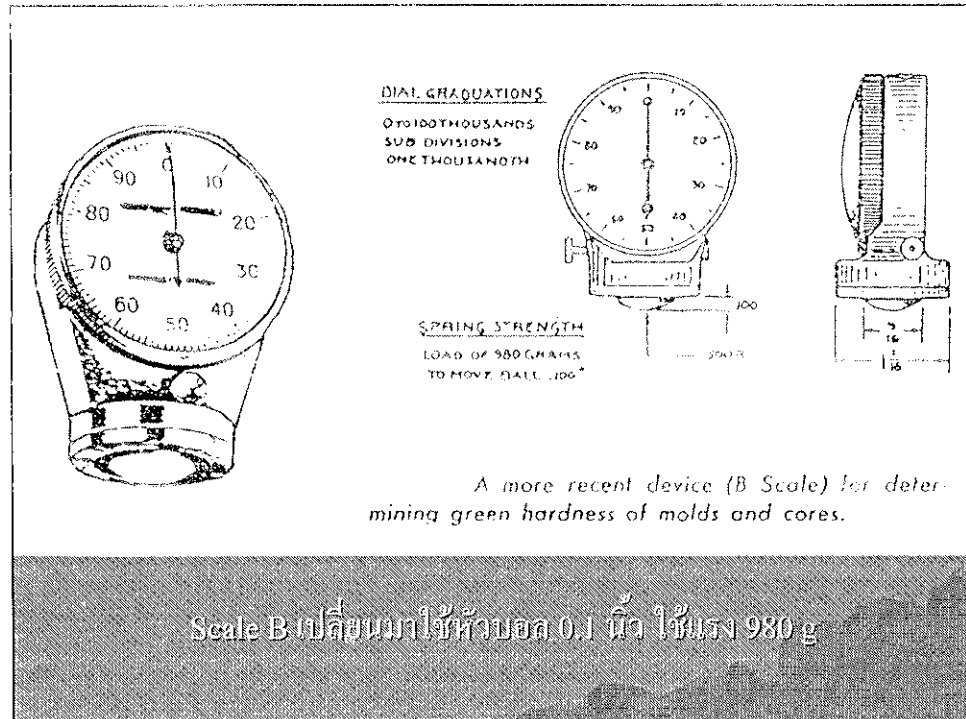
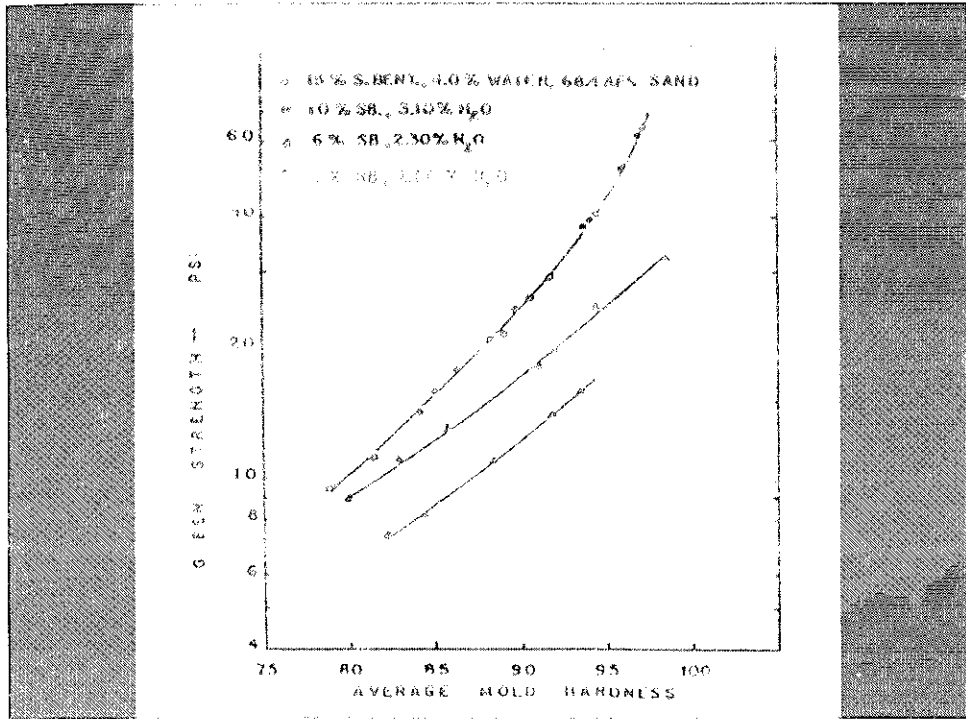
$$\begin{aligned}
 \text{ค่าความละเอียด AFS} &= \frac{\text{Sum of Product}}{\text{Sum of Retained}} \\
 &= 9815/90.5 \\
 &= 104
 \end{aligned}$$

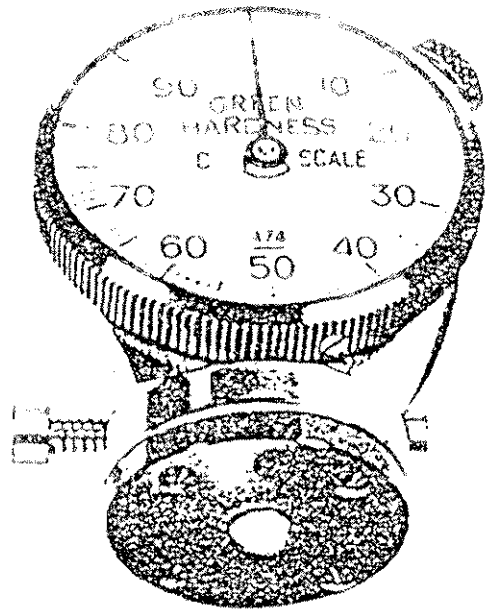
สำหรับการหาค่าความละเอียด JIS มีวิธีการ  
เหมือนกันแต่ต่างกันที่ Multiplier ไม่เท่ากัน

### Hardness Surface Test

- ◆ หลังจากตีแบบเสร็จแล้วจะทำการวัดความแข็งของผิวแบบเพื่อประเมิน Green Strength และ Permeability
- ◆ อุปกรณ์วัดมีลักษณะคล้าย Rockwell Hardness Tester สำหรับ Scale A ประกอบด้วยหัวบอลขนาด 0.2 นิ้วมีแรงกด 237 g
- ◆ ถ้าผิวแบบแข็ง หัวบอลไม่จมลึกลงไป ค่าที่อ่านได้สูง
- ◆ ถ้าผิวแบบอ่อน หัวบอลจมลึกลงไปได้มาก ค่าที่อ่านได้ต่ำ







Scale C เปลี่ยนมาใช้  
หัวกรวย ใช้วัดใน  
กรณีที่มีความแข็งเกิน  
85 Scale A

บทที่ 3 เครื่องมือและกรรมวิธีการทำแบบ  
(Molding Processes and Equipment)

Molding Equipment

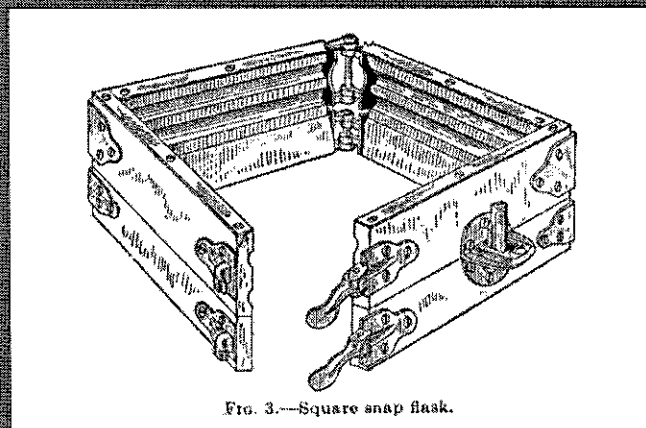


FIG. 3.—Square snap flask.

Snap Flask



Molding Equipment

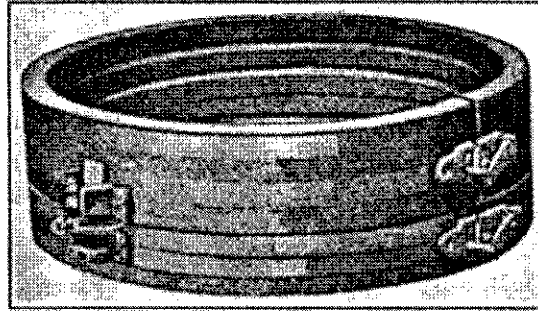
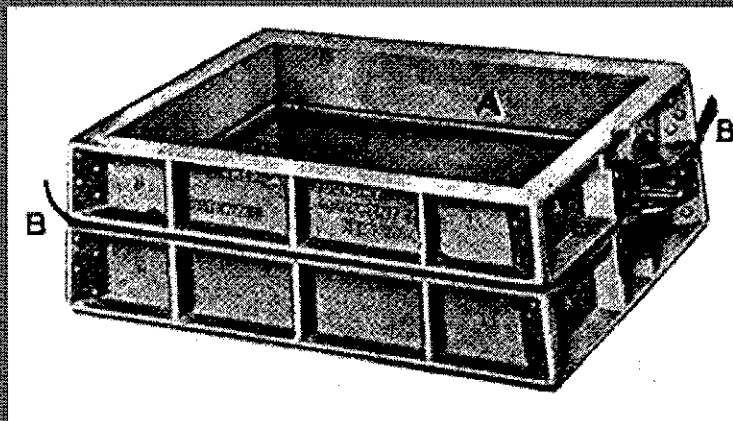


FIG. 4.—Round snap flask.

Round Snap Flask

Molding Equipment



Slip Flask

Molding Equipment

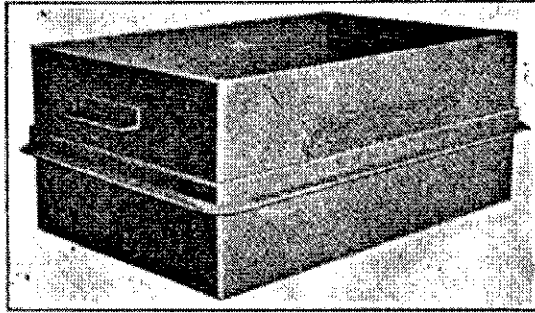


FIG. 6.—Slip jacket.

Slip Jacket

Molding Equipment

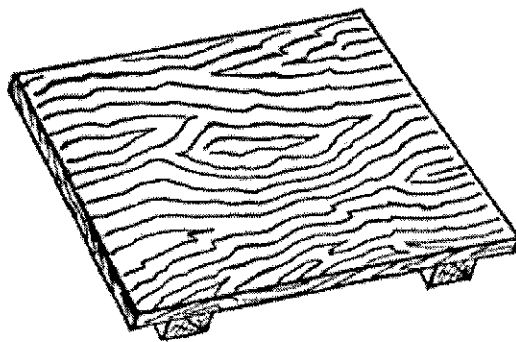


FIG. 13.—Molding board.

Molding Board

## Molding Equipment

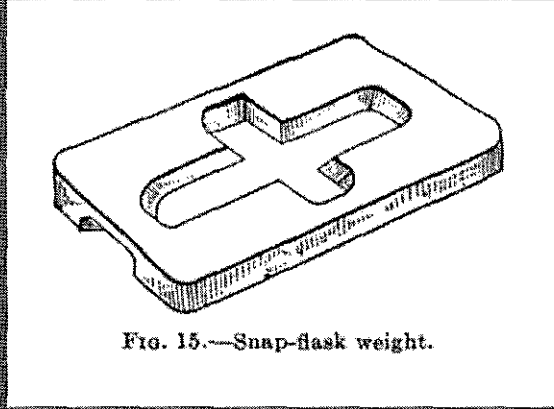


FIG. 15.—Snap-flask weight.

## Snap Flask Weight

Because the specific gravity of sand is less than specific gravity of poured iron. The poured metal and gas pressure tends to lift the cope and separating. The cope is weighted or clamped to prevent the separation.

The weight is estimated by the product of surface of casting and the height of the cope and specific gravity of poured metal, then subtracted by product of volume of cope and specific gravity of molding sand.



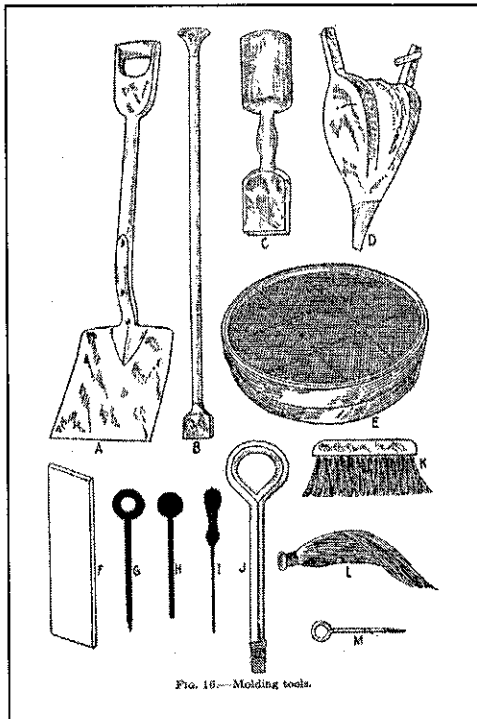
**Example** Assume that a casting 12 cm wide, 18 cm long and 1 cm thick is to be molded in a flask 18 x 20 cm, with a cope 5 cm deep. How much weight should be put on top of the mold to hold the cope down?

**Solution:**

Fluid weight force up the cope  
 $= 12 \times 18 \times 5 \times 7.78 = 8402.4 \text{ g}$

Weight of cope  
 $= 18 \times 20 \times 5 \times 2.5 = 4500 \text{ g}$

Weight must to be added  
 $= 8402.4 - 4500$   
 $= 3902.4 \text{ g}$   
 $= 3.9 \text{ kg}$



## Molding Tools

- A : Shovel
- B : Floor Rammer
- C : Bench Rammer
- D : Bellows
- E : Riddle
- F : Straightedge
- G : Draw Spike
- H : Rapping Bar
- I : Vent Wire
- J : Draw Screw
- K, L : Swab
- M : Wood Screw

## Molding Tools

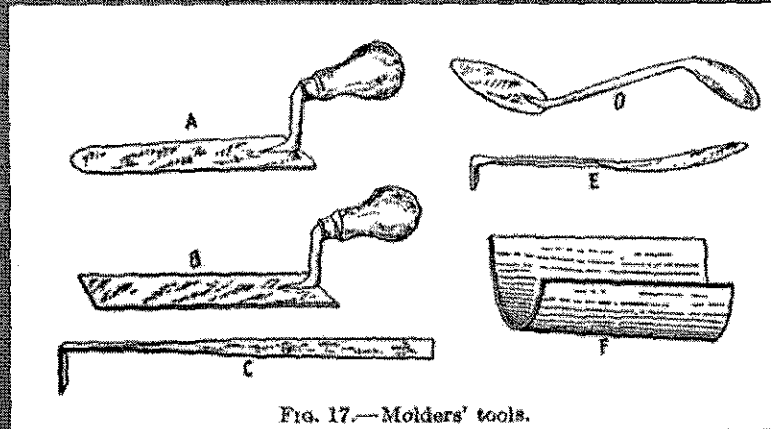


FIG. 17.—Molders' tools.

- |                      |                                |
|----------------------|--------------------------------|
| A : Finishing Trowel | D : Double-Ended Slick & Spoon |
| B : Square Trowel    | E : Yankee Lifter              |
| C : Lifter           | F : Gate Cutter                |

## Molding Processes

- Green Sand Mold
- Dry Sand Mold
- Core Sand Mold
- Cement-Bonded Mold
- Loam Sand Mold
- Shell Mold
- Lost Wax Process
- V-Process
- No-Baking Process
- Fluid or Castable Sand Mold

## Green Sand Mold

คือการทำแบบทรายจากทรายที่ใช้ Clay เป็น Binder ซึ่งต้องมีน้ำเป็นส่วนประกอบ 4 – 8% จึงเรียกว่า Green Sand Mold

### ข้อได้เปรียบ

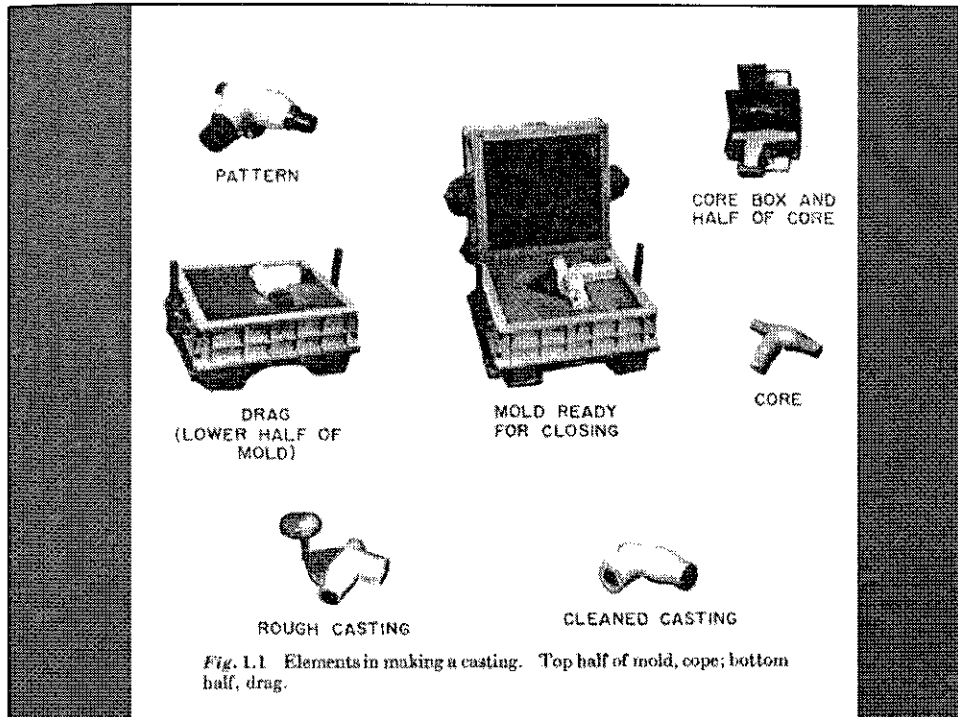
- สามารถใช้คนหรือเครื่องจักรปั้นแบบก็ได้ และแก้ไขได้ง่าย
- สามารถปั้นแบบได้โดยตรงจาก Pattern ไม่ต้องมีอุปกรณ์อื่น
- ประหยัดที่สุด นำทรายกลับมาใช้ใหม่ได้ง่าย

## Green Sand Mold

### ข้อเสียเปรียบ

- มี Strength ต่ำ ถ้าแบบมีพื้นที่บางและยื่นออกมาจากบริเวณอื่นจะถูกน้ำโลหะเซาะพังได้ง่าย
- ทรายแบบมีความชื้น ถ้ากำจัดไม่หมด ทำให้เกิด defect ได้ง่าย
- ควบคุมความแน่นอนของมิติชิ้นงานได้ยาก
- ผิวงานหล่อไม่สวยงาม





## Dry Sand Mold

### แบ่งออกเป็น 2 วิธี

- Skin Dried Sand เป็นวิธีที่ใช้ทรายแบบแห้งเฉพาะบริเวณผิวหน้าหนาประมาณ 1-2 ซม. ทรายที่ใช้ได้แก่ Chromite หรือ Zircon Sand โดยอาจใช้ Na-Silicate เป็น Binder ให้ความแข็งที่ผิวสูง ทนต่อการกัดเซาะของน้ำโลหะ ลึกลงไปเป็นทรายธรรมดาเรียก Backing Sand
- Dry Sand Mold เป็นวิธีที่ใช้ทรายผสมกับ Binder พวก Resin หรือ Na Silicate ทำให้ได้แบบทรายที่มีความแข็งแรงมาก แต่รีไซเคิลได้ยาก มีราคาสูง นำทรายกลับมาใช้ใหม่ได้ยาก

## Core Sand Mold

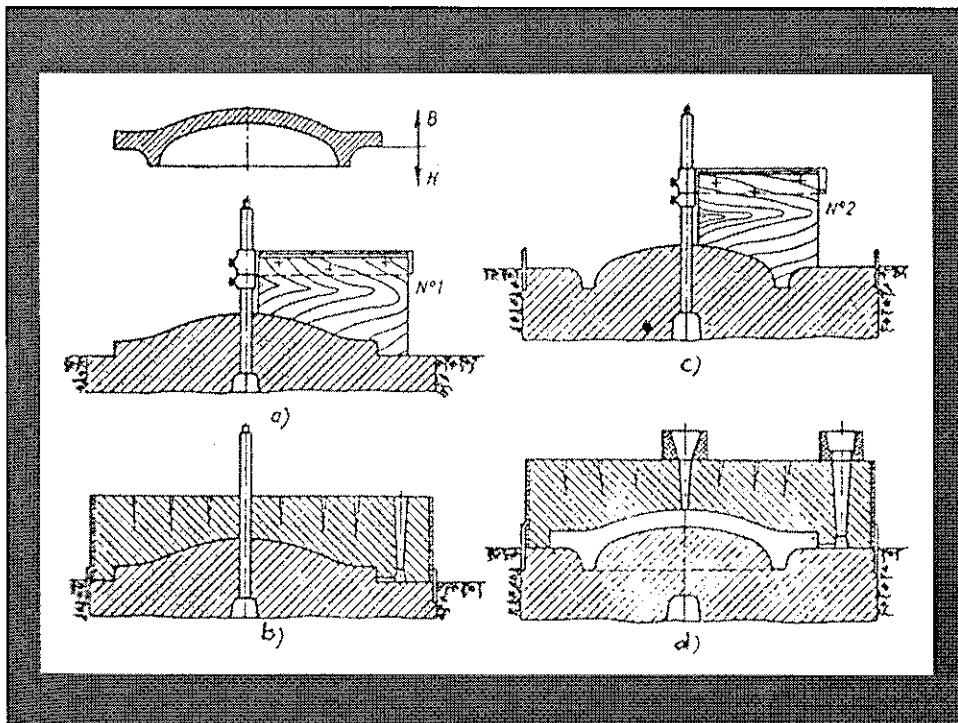
- เป็นกรรมวิธีการทำแบบคล้ายกับการทำ Core โดยใช้ Core box ถัดทรายให้ได้รูปร่างตามต้องการ ตามจำนวนที่ออกแบบไว้แล้ว ประกอบกันเป็นแบบทราย
- วิธีนี้ไม่ต้องมี Flask
- ใช้ Binder แบบเดียวกับ Dry Sand Mold

## Cement-Bonded Sand Mold

- ใช้ทรายแบบผสมกับ Cement แทน Clay
- ปกติใช้ Cement ในงานก่อสร้าง 8-12% ผสมกับน้ำ 4-6%
- เมื่อทำแบบเสร็จใหม่ ๆ จะยังไม่มี ความแข็งแรงต้องรอประมาณ 8-10 ชั่วโมงจึงจะถอดแบบได้ และต้องรออีกประมาณ 72 ชั่วโมงถึงจะได้ความแข็งแรงสูง
- ก่อนเทโลหะหลอมเหลวต้องเผาผลาร้อนไล่ความชื้นออกให้หมด
- มี Collapsibility ต่ำ ร้อนแบบยาก อาจเกิด Hot Tear ได้ง่าย

## Loam Sand Mold

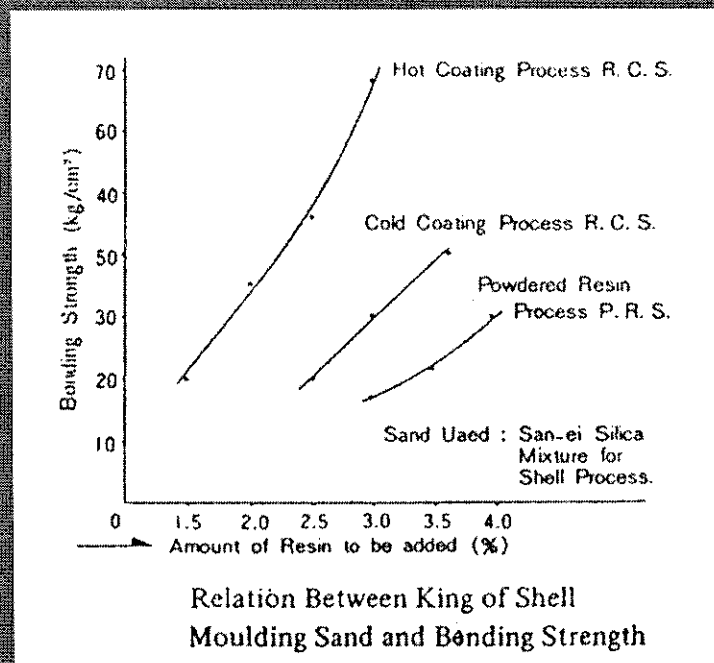
- ใช้สำหรับทำแบบทรายขนาดใหญ่และทำจำนวนไม่มาก
- ไม่ต้องใช้ Pattern เต็ม แต่ใช้ Pattern แบบกวาด ที่มีส่วนเว้าโค้งตามรูปร่างชิ้นงาน เมื่อหมุน Pattern แล้วจะทำให้ได้รูปร่างชิ้นงานที่ต้องการ
- เริ่มจากการก่ออิฐให้ได้โครงแล้วนำซีเมนต์หรือฟางข้าวผสมทรายและ Clay เกลบบนโครงแล้วใช้ Pattern กวาดไปมาจนได้รูปร่างที่ต้องการ
- Binder ที่ใช้ได้แก่ Na silicate หรือ Bentonite





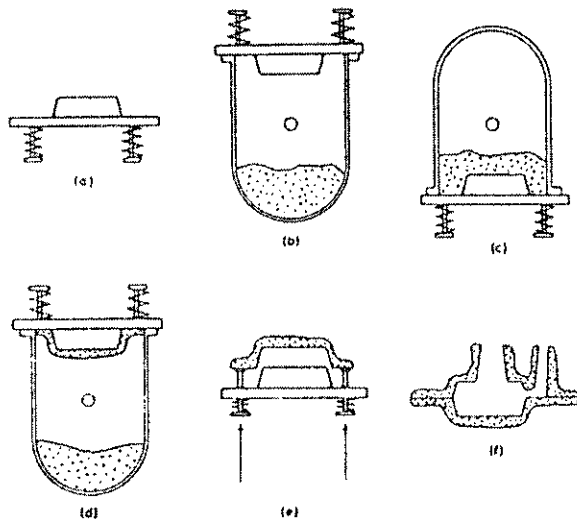
## Shell Mold

- แบบหล่อมีลักษณะคล้ายเปลือกจึงเรียกว่า "Shell Mold"
- ใช้ทรายแก้วรูปวงเม็ดกลมผสมกับ Phenol Formaldehyde ประมาณ 1 – 1.5% และ Hexamine 1.0 – 1.5% ของน้ำหนักทราย
- การผสมเรซินทำได้ 3 แบบคือ Powder resin, Cold coating และ Hot Coating



## Shell Mold

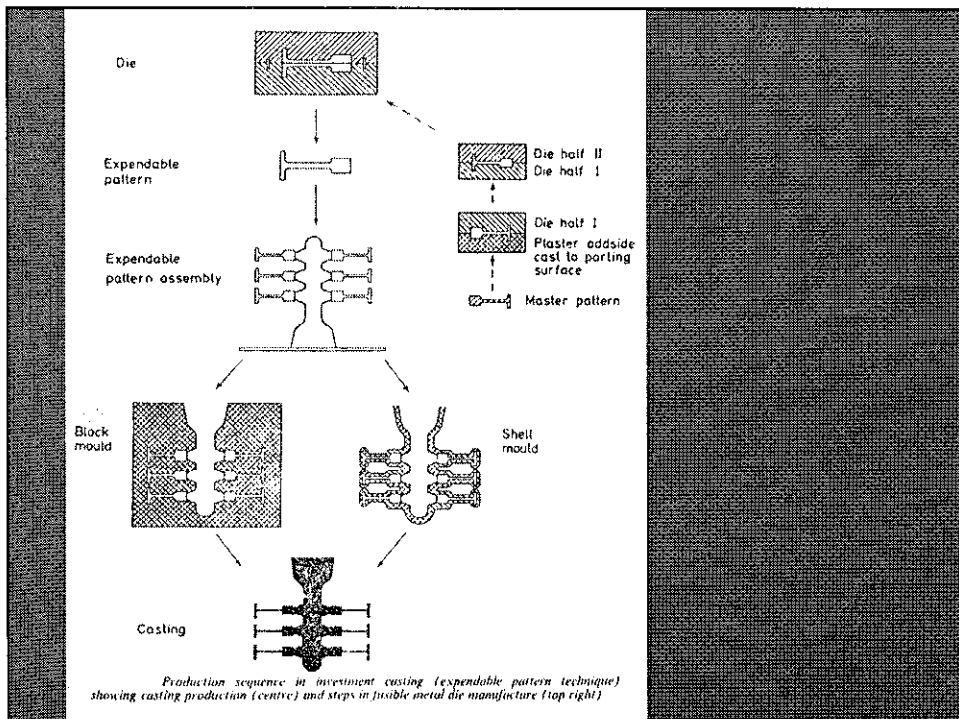
- Pattern มีรูปร่างเหมือนชิ้นงานฝาซึก ต้องเผาให้ร้อนถึง 180 องศาเซลเซียส ใช้ซิลิโคนหรือผงซิลิกาทาเพื่อให้เอาแบบออกได้สะดวก
- นำทรายที่ผสมกับเรซินไปเคลบ จะเกิดการแข็งตัว ทั้งได้ 10 วินาที
- พลิกแบบกลับให้ทรายที่ยังไม่แข็งตัวหล่นออกไปจะได้ชั้นของแบบทราย นำไปอบต่อที่ 150 องศาเซลเซียส
- แบบทรายที่ได้จะมีผิวที่ดีมาก นำแบบทรายมาประกอบกัน



Basic production sequence in shell moulding: (a) pattern plate, (b) pattern plate mounted on dump box, (c)-(d) investment, (e) ejection, (f) shell assembly

## Investment Casting

- เรียกอีกชื่อหนึ่งว่า "Lost wax process"
- เหมาะสำหรับการหล่องานที่มีขนาดเล็ก มีลวดลายละเอียด
- ปูนหรือหล่อขี้ผึ้งให้ได้รูปร่างที่ต้องการ แล้วนำไปเคลือบด้วยวัสดุทนไฟ (Investment) ผสมกับปูนปลาสเตอร์หรือ Ethyl Silicate ( $\text{Si}(\text{COC}_2\text{H}_5)_2$ )
- อบให้แห้งแล้ววางแบบลงในพิมพ์เหล็ก เเท Investment ได้พิมพ์แบบจนเต็ม เผลาไล้ขี้ผึ้งออกให้หมดแล้วจึงเทน้ำโลหะ





## V-Process

● ใช้แรงดันจากสุญญากาศทำให้เม็ดทรายยึดเกาะกันได้ ไม่ต้องใช้ Binder

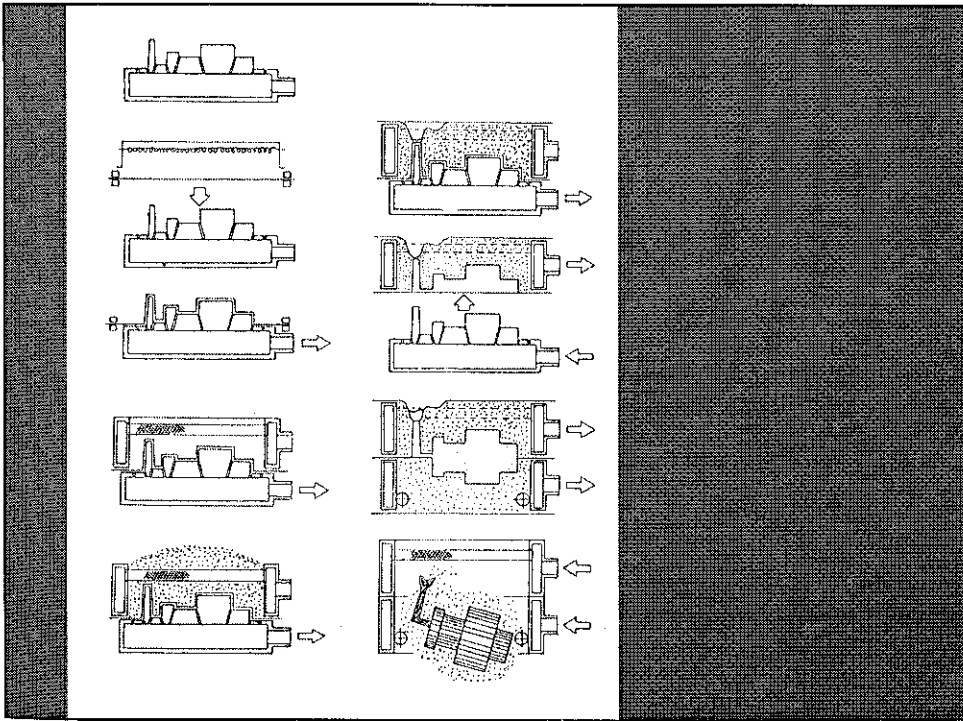
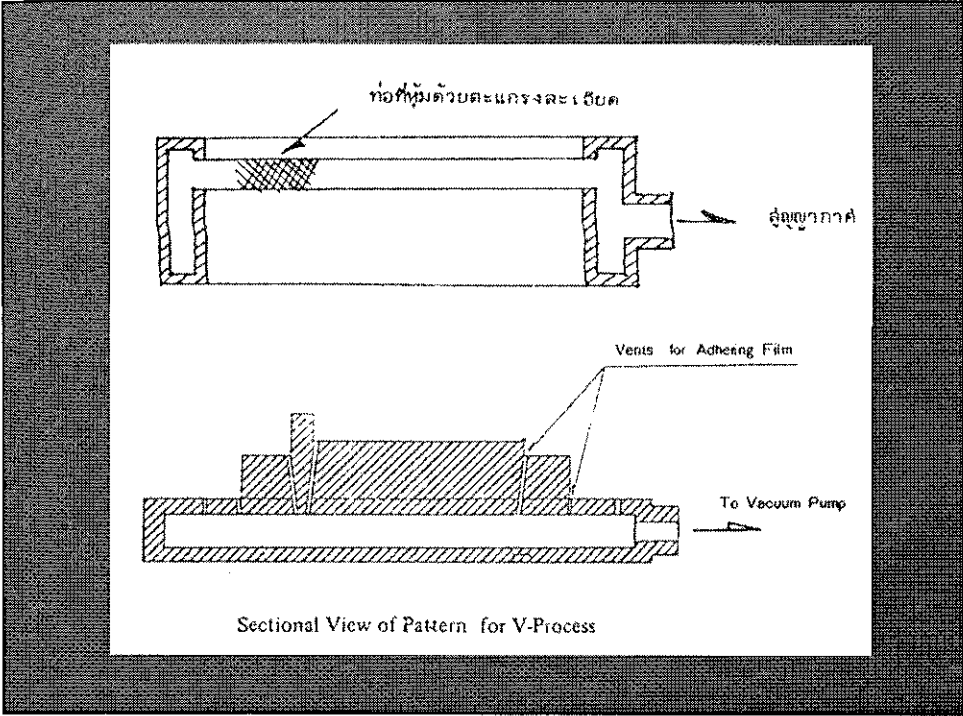
● ข้อได้เปรียบ

- ปราศจากเสียงดังจากเครื่องทำแบบ
- ไม่ต้องใช้ Binder นำทรายกลับมาใช้ใหม่ได้ทั้งหมด ของเสียน้อย
- โรงงานใช้พื้นที่น้อยกว่า ไม่ต้องมีเครื่องผสมและแยกทราย
- ไม่จำเป็นต้องใช้ช่างที่มีฝีมือมาก

## V-Process

● ข้อเสียเปรียบ

- ต้นทุนการทำแบบสูง
- แบบหล่อจะต้องมีรูปร่างไม่ซับซ้อนมากนัก
- เหมาะสำหรับการผลิตชิ้นส่วนจำนวนมากเท่านั้น เพราะต้นทุนการทำแบบสูง



## No-Baking Process

- เป็นกระบวนการที่ไม่ต้องมีการเผาแบบทรายเพื่อให้ความขึ้น
- ใช้ Furan resin เป็น Binder ไม่มีการใช้น้ำทำให้ปัญหาจากแก๊สในทรายแบบหมดไป
- ข้อได้เปรียบ
  - ไม่ต้องมีการเผาแบบก่อนเทน้ำโลหะ
  - ทรายแบบมี Collapsibility ดี นำทรายกลับไปใช้ใหม่ได้
  - มีความแข็งแรงกว่า Green Sand Molding

## No-Baking Process

- ข้อเสียเปรียบ
  - ราคาแพงกว่า Green Sand Molding หลายเท่าตัว
  - ต้องใช้เครื่องผสมทรายพิเศษเฉพาะ
  - มีระยะเวลาการแข็งตัว คนอาจไม่สามารถทำแบบได้ทัน
  - มีกลิ่นเหม็น
- ต้องผสมทรายกับ Hardener ก่อนแล้วจึงผสมกับ resin



## Fluid or Castable Mold

- ใช้ Silica sand ผสม Na silicate, Di-calcium Silicate และ Detergent
- Di-calcium silicate เป็นสารทำให้เกิดการแข็งตัวของทราย
- Detergent เป็นสารช่วยเพิ่ม Fluidity
- วิธีนี้เหมาะสำหรับงานหล่อขนาดใหญ่ โดยให้ทรายที่ผสมแล้วไหลไปตามโพรงแบบของ Pattern และเกิดการแข็งตัว

## Fluid or Castable Mold

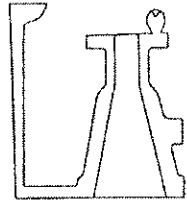
- ข้อได้เปรียบ
  - ไม่มีเสียงดัง หรือ ฝุ่นมาก เนื่องจากไม่ต้องใช้เครื่องตําทรายแบบ
- ข้อเสียเปรียบ
  - ต้องใช้แบบหล่อที่ถอดแบบทรายออกได้ง่าย
  - ต้องอบให้แห้งก่อนเทน้ำโลหะ
  - มี Collapsibility ตํา น้ำกลับมากทำให้ไหมได้ยาก ต้องล้าง Na Silicate ออกให้หมดก่อน

## Full Mold Casting

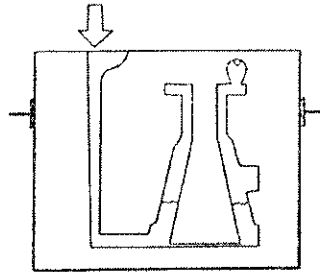
- ใช้วัสดุที่ระเหยเป็นไอได้ง่ายทำเป็น Pattern แล้วนำมาตัดหรือฉีกขึ้นรูปให้เหมือนกับรูปร่างชิ้นงานที่ต้องการแล้วติดตั้งรูเท รูล้น รูไอ ฯ ด้วยกาวทาขาว
- นำ Pattern ที่ได้ไปทานิวด้วยสีทาแบบ แล้วนำไปฝังในทรายแบบ กระทั่งให้แน่นจนเต็มทึบ นำน้ำหนักวางทับผิวด้านบนของทึบเพื่อกดทับแรงดันจากก๊าซ
- เมื่อเทน้ำโลหะหลอมเหลวลงไปวัสดุ Pattern จะกลายเป็นไอระเหยออกไป

## Full Mold Casting

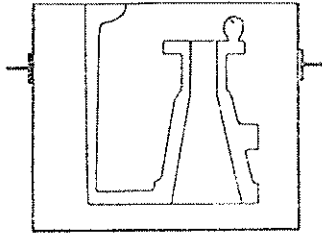
- วัสดุที่ใช้ทำเป็น Pattern ได้แก่ Foam Polystyrene
- ข้อได้เปรียบ
  - ใช้ทึบแบบใบเดียวไม่ต้องมี Cope และ Drag (ทึบบนและทึบล่าง)
  - เหมาะสำหรับงานขนาดใหญ่จำนวนน้อย ที่ไม่คุ้มที่จะทำ Pattern ด้วยไม้
  - รวดเร็วไม่ต้องมีการถอด Pattern
- ข้อเสียเปรียบ
  - เกิดก๊าซขึ้นจำนวนมาก อาจทำให้รูปร่างบิดเบี้ยวถ้าทรายแบบไม่แข็งแรงและมีโอกาสที่จะเกิด Defect จากก๊าซได้มาก
  - ผิวชิ้นงานมักจะไม่ดี



(a) Ingot and casting pattern made by foam polystyrene



(c) By pouring the molten metal, the pattern is burnt and vaporized and the cavity is filled with molten metal



(b) Set the pattern in moulding box and fill the box with moulding sand



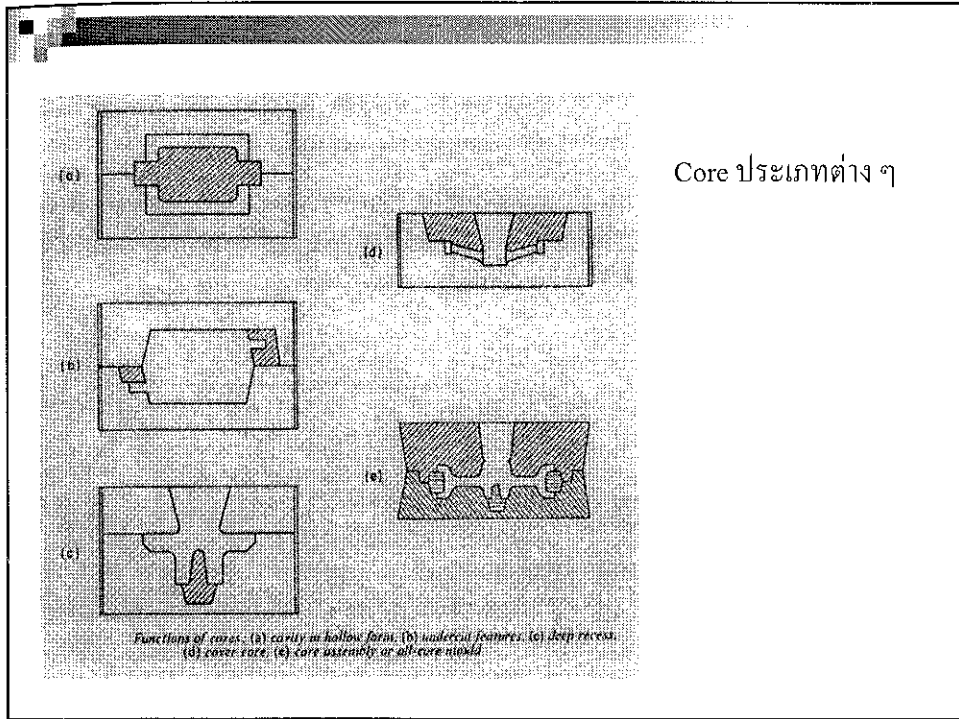
(d) Casting



## บทที่ 4 การทำไส้แบบ (Core Making)

### Core

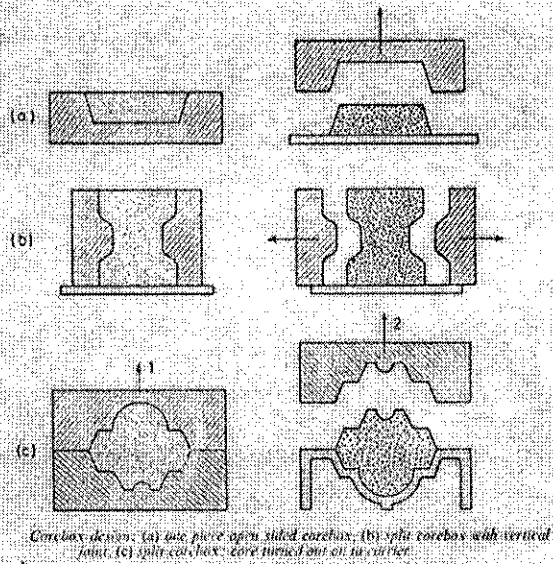
- Core คือส่วนของทรายที่ติดไว้ในโพรงแบบเพื่อให้เกิดเป็นช่องว่าง รู หรือส่วนเว้าโค้งต่าง ๆ
- เหตุผลที่ต้องใช้ Core เนื่องจาก ถ้าใช้ Pattern ธรรมดาจะทำให้การถอดแบบไม่ได้ หรือจำนวนชิ้นของ Pattern ที่ประกอบกันมาก



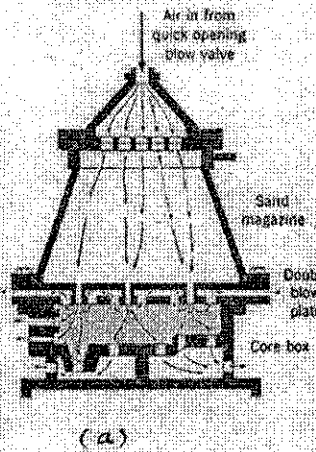
## Core Box

- Core Box เป็นเสมือนแม่พิมพ์ซึ่งมีโพรงเป็นช่องว่างรูปร่างเหมือนรูปร่างของ Core ที่ต้องการ
- อัด Core Sand ลงใน Core box ด้วยวิธีต่าง ๆ เช่น Hand Ramming หรือใช้เครื่องจักรได้แก่ Core Blower และ Core Shooter

วิธีการอัดขึ้นรูป Core

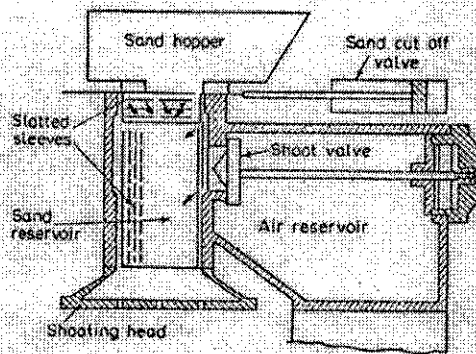


Core box design: (a) one-piece open sided core box; (b) split core box with vertical joint; (c) split core box, core turned out at an angle.



(a)

Core Blower



(b)

Core Shooter



## Core Sand

■ Core Sand จะถูกล้อมรอบด้วยน้ำโลหะหลอมเหลว ต้องมีสมบัติ ดังนี้

- Thermal Stability & Refractoriness
- Permeability
- Collapsibility
- Green, Dry & Hot Strength

## Binder

■ Binder ที่ดีสำหรับ Core Sand ควร

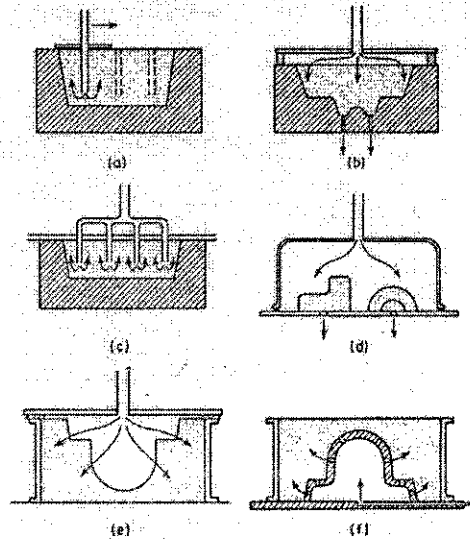
- เมื่อสัมผัสกับน้ำโลหะไม่ทำให้เกิด Gas มากนัก
- ให้ความแข็งแรงสูง
- ให้ Collapsibility ดี
- ให้ Permeability ดี
- ราคาถูก

# Binder

## ■ ประเภทของ Binder

- Core Oil ส่วนมากเป็นน้ำมันผสม เช่น Linseed Oil, Palm Oil, หรือน้ำมันจากสัตว์ ผสมกับทราย ใช้ประมาณ 2-4% โดยน้ำหนัก นำไปอบแห้ง มักจะทำให้เกิด Gas มาก แต่ให้ Collapsibility ดี
- Thermo Setting Resin ได้แก่ Phenol & Urea formaldehyde เกิด Gas น้อยกว่าน้ำมัน ให้ความแข็งแรงสูง
- CO<sub>2</sub> Process ใช้ Na silicate ผสมกับทรายแล้วให้ Gas Carbondioxide ทำปฏิกิริยาให้ความแข็งแรง

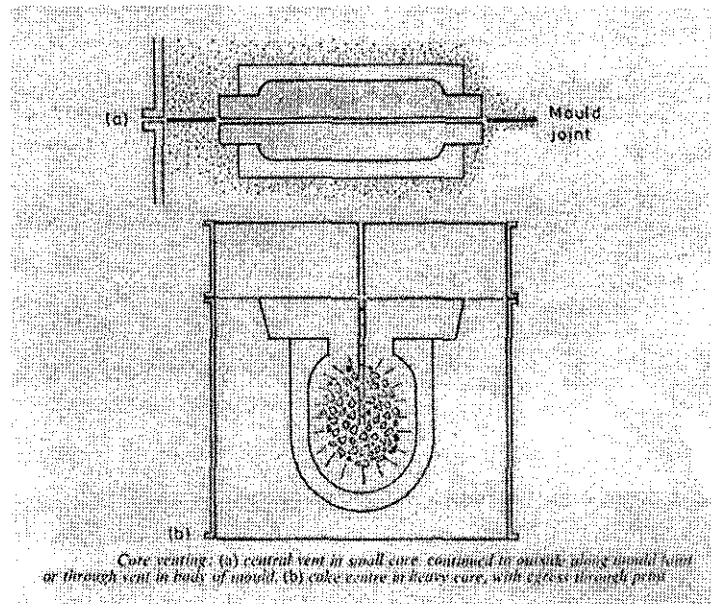
## วิธีการพ่น Gas CO<sub>2</sub>



Examples of systems for carbon dioxide hardening of cores and mould parts:  
(a) progressive treatment using single probe, (b) cover board or hood, (c) multiple probe and manifold, (d) hood over previously stripped cores, (e) treatment of mould after pattern draw, (f) passage of gas through hollow pattern.

## การระบายอากาศและเสริมความแข็งแรง

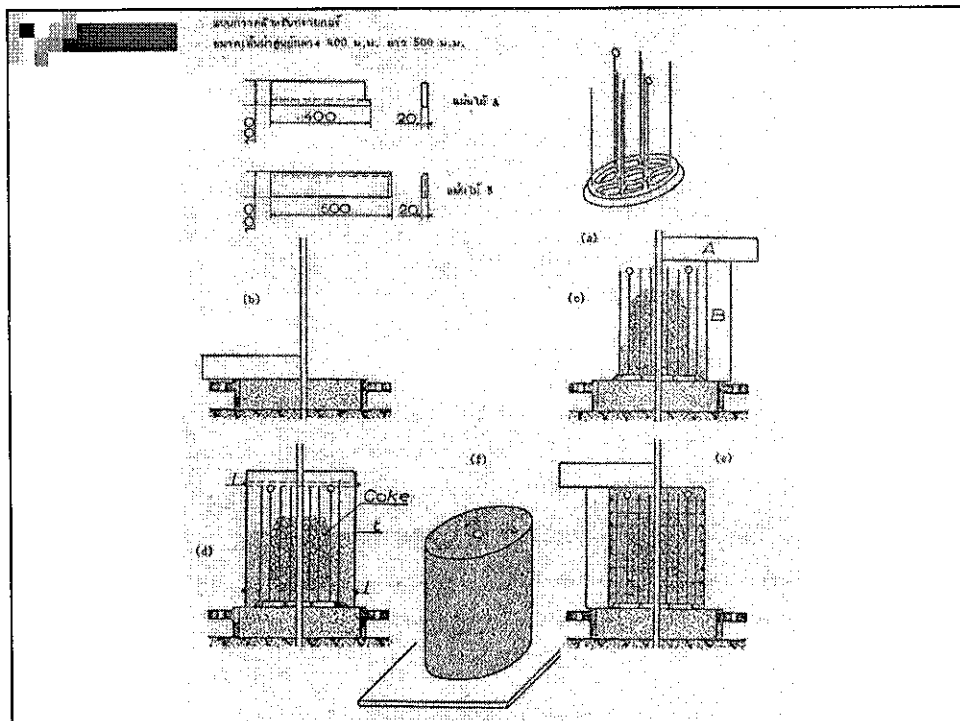
- สำหรับ Core ที่มีขนาดใหญ่จะมีปัญหาเรื่องการระบายอากาศและความแข็งแรงไม่เพียงพอ
- ทำให้ Core มี Permeability สูงขึ้นด้วยการใส่ถ่าน Coke หรือเศษ Slag ลงไปตรงกลางให้เกิดช่องว่างแล้วต่อท่อเหล็กลงไปผ่านรอยต่อของหีบแบบ
- ทำให้ Core มีความแข็งแรงสูงขึ้นด้วยการใช้เหล็กเป็นโครงสร้าง

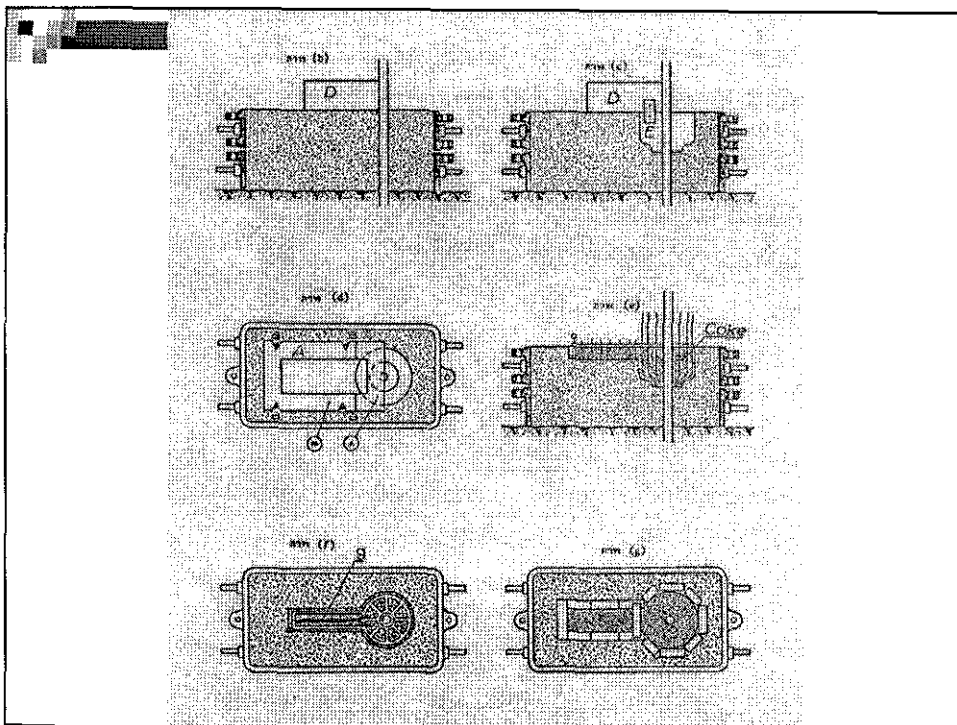
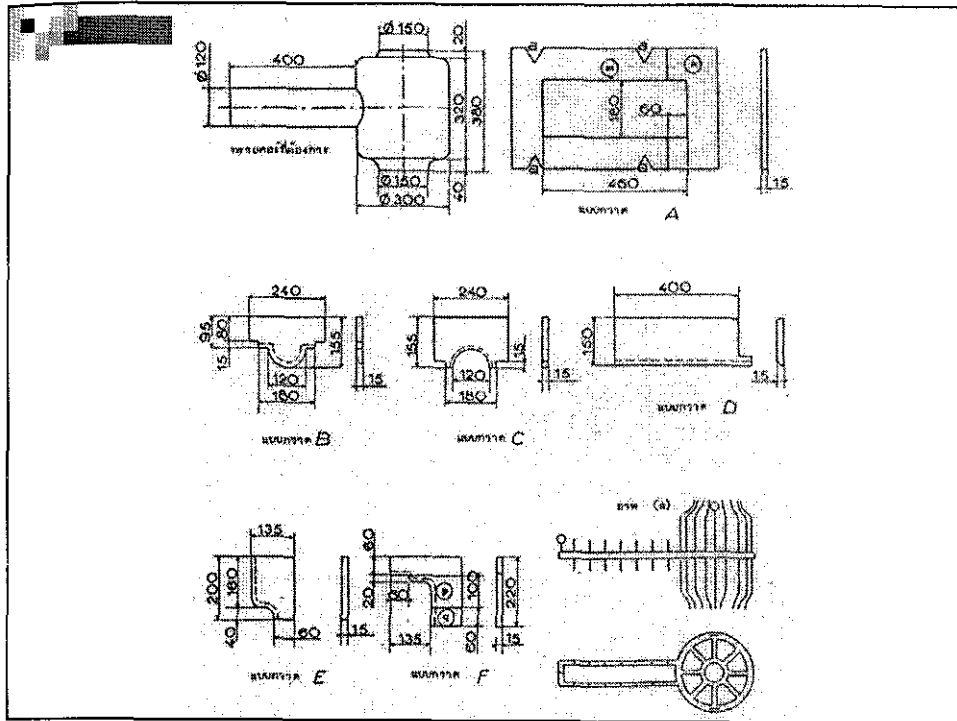


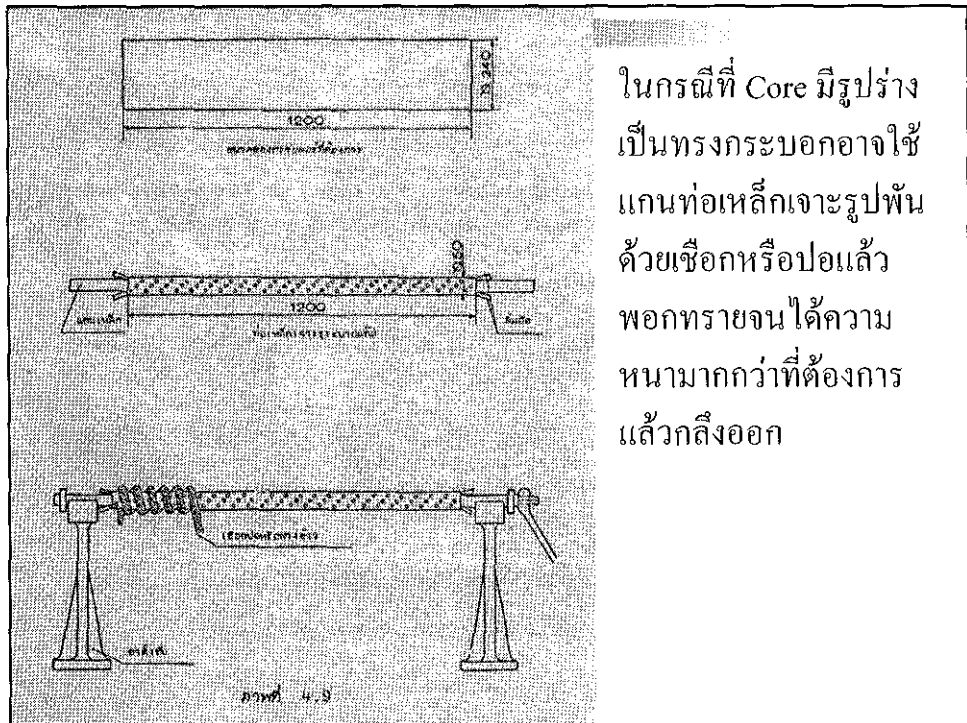
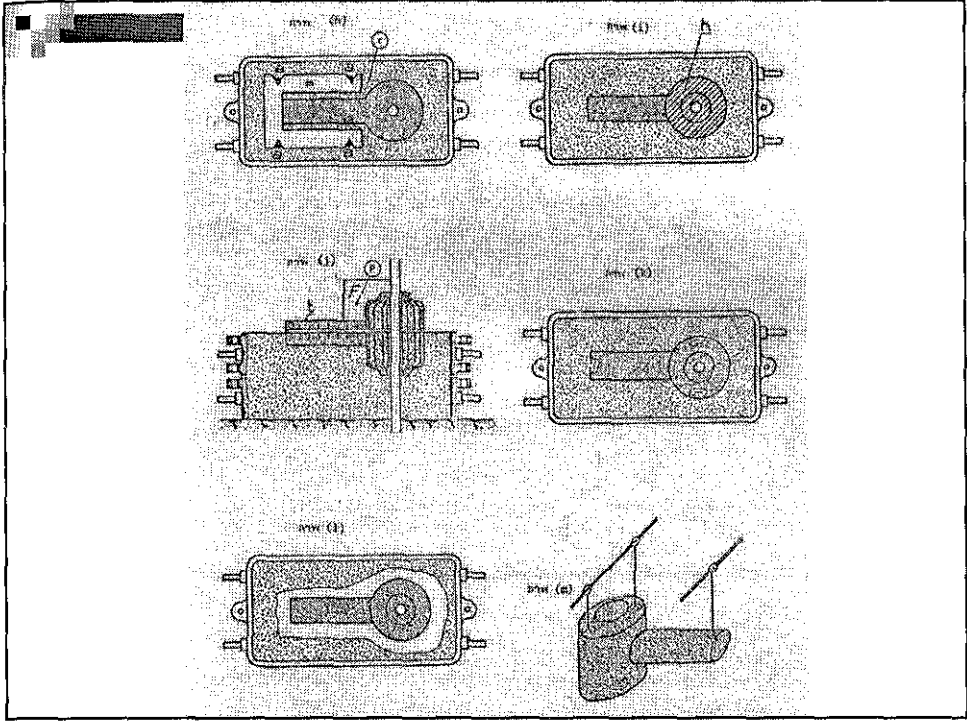


## การทำ Core โดยไม่ใช้ Core Box

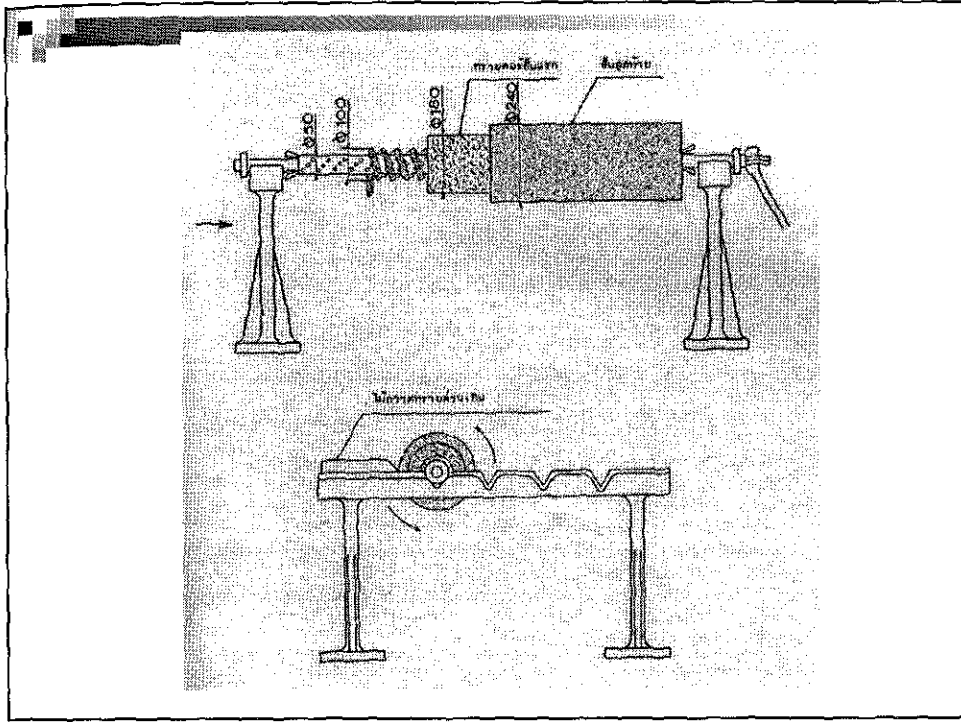
- ใช้วิธีการ Loaming โดยใช้ Pattern ไม้กวาดจนได้รูปร่างตามต้องการ
- เหมาะสำหรับงานที่มีขนาดใหญ่และทำจำนวนน้อย เนื่องจากไม้ค้ำที่จะลงทุนทำ Core Box





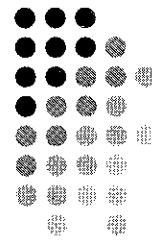




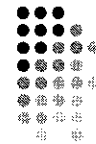


## บทที่ 5 เครื่องทำแบบทราย

### Molding Machine



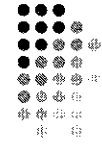
### Molding Machine



- Hand Rammer

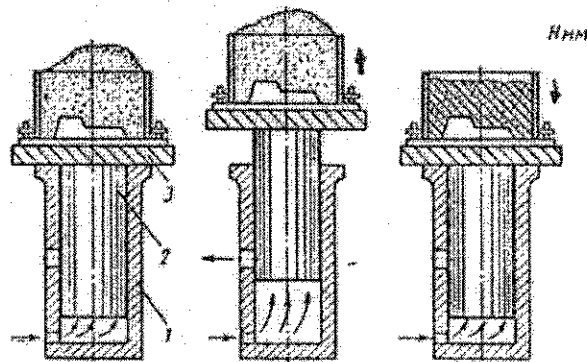
- ประกอบไปด้วยลูกสูบต่อกับ Rammer ถูกเร่งด้วยสปริง
- ลูกสูบจะได้รับแรงดันอากาศอัดให้เคลื่อนลงทำให้ Rammer กระแทกทราย
- เมื่อลูกสูบเคลื่อนผ่านช่องพิกัก แรงดันจะตกลงและสปริงจะเร่งลูกสูบกลับ เป็นเช่นนี้ไปเรื่อย ๆ
- ขณะทำงานจะดูเหมือนเครื่องกำลังสั่น
- ใช้งานโดยใช้มือเลื่อน Rammer ไปยังบริเวณที่ต้องการ

# Molding Machine



- Jolt Ramming

- อาศัยการเขย่าทรายให้หีบแบบจนเกิดการอัดแน่นตัวของทราย
- หลักการเหมือนกับ Hand Rammer แต่ต่างกันที่ Jolt Ramming ไม่มีสปริง ใช้น้ำหนักของหีบแบบแทน



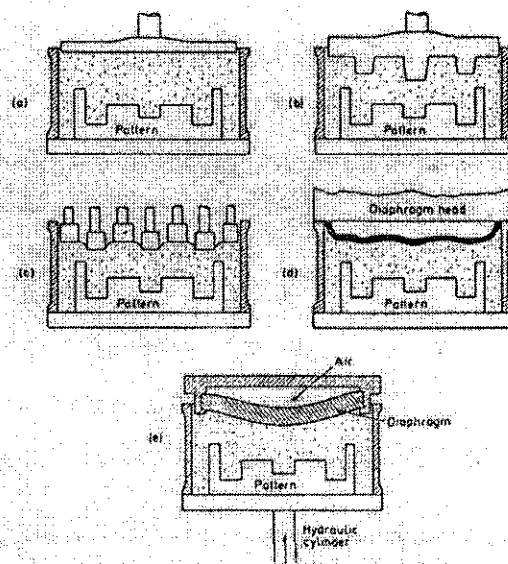
ภาพที่ 5.1 แสดงการทำงานของ Jolt molding machine

- 1) กระบอกสูบ 2) ลูกสูบ 3) โด๊ว

# Molding Machine

- Squeezing

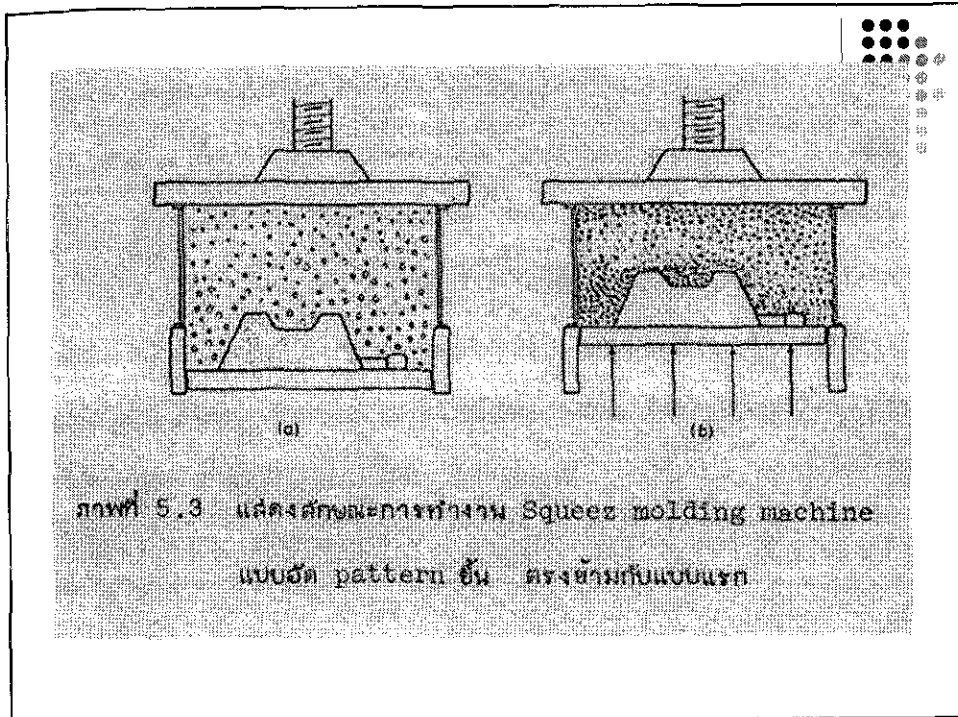
- ใช้แรงอากาศอัดถูกสูบให้ Rammer บีบทรายทั้งหีบ
- ความหนาแน่นของทรายแต่ละบริเวณไม่สม่ำเสมอ จึงมีการออกแบบเพื่อแก้ไข โดยให้ทรายแต่ละบริเวณได้รับแรงอัดไม่เท่ากันตามรูปร่างของแบบ



ภาพที่ 5.2 แสดงการทำงานของ Squeeze molding machine

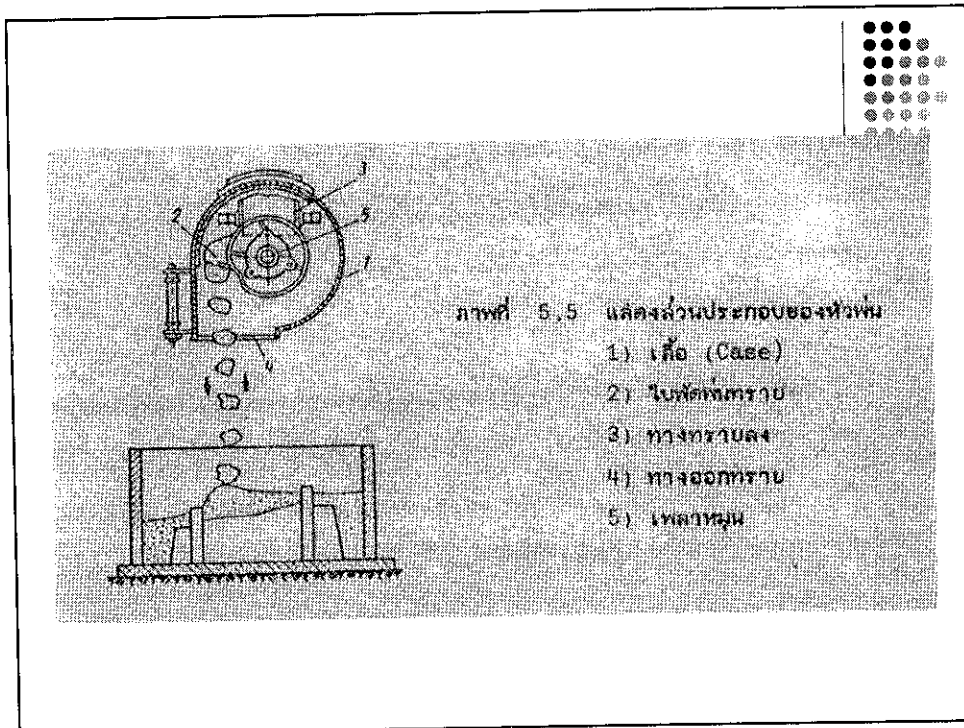
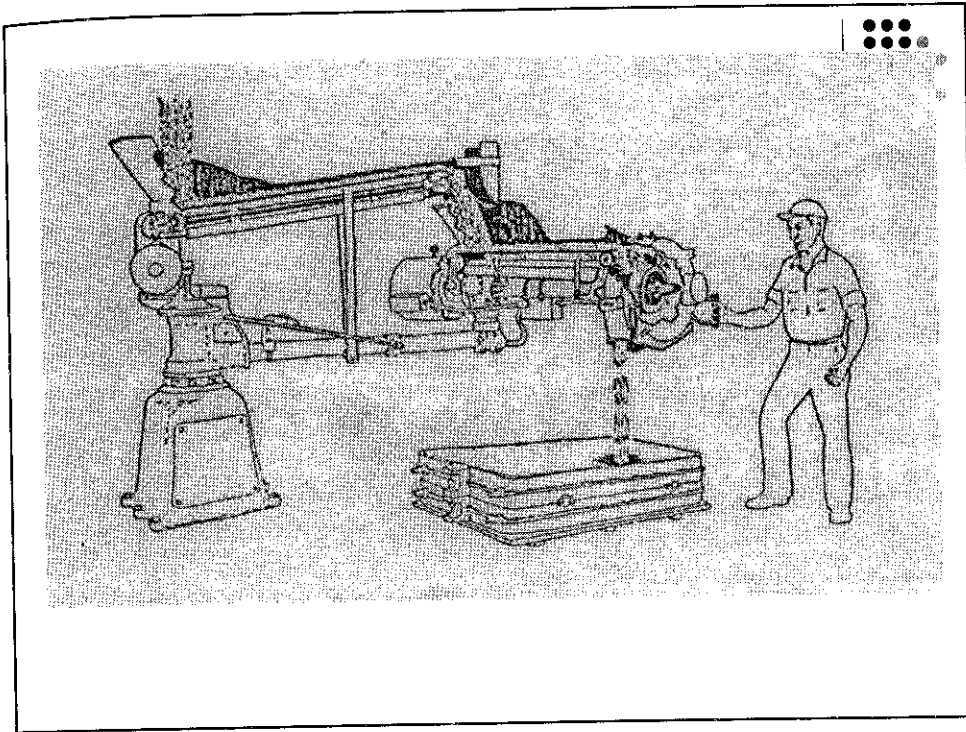
และแบบต่าง ๆ ของ Squeeze head.





## Molding Machine

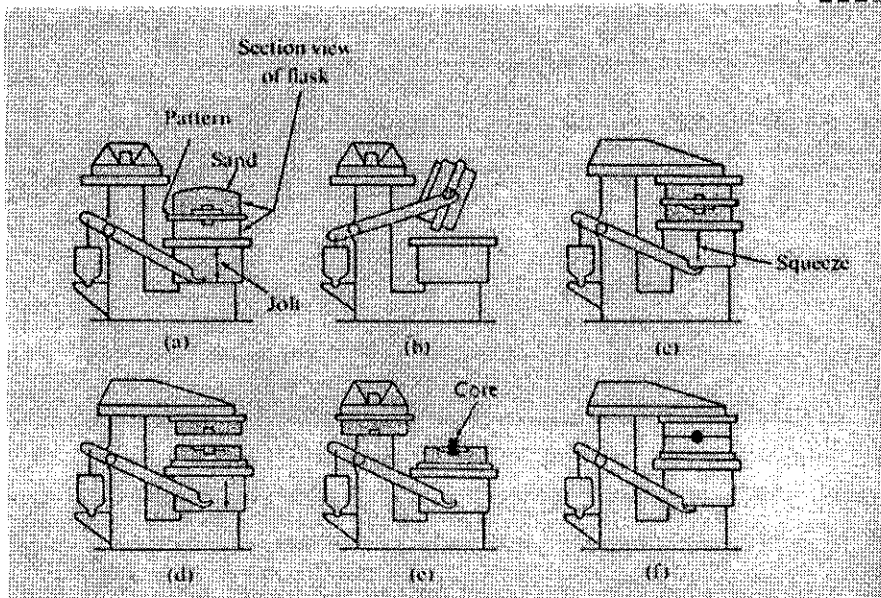
- Sand Slinger
  - เป็นเครื่องพ่นทราย
  - คนงานใช้มือเลื่อนหัวพ่นไปตามบริเวณต่างๆ ของแบบ
  - เหมาะใช้กับงานขนาดใหญ่
  - ให้ความหนาแน่นของทรายสม่ำเสมอมากกว่าวิธีอื่น



## Molding Machine

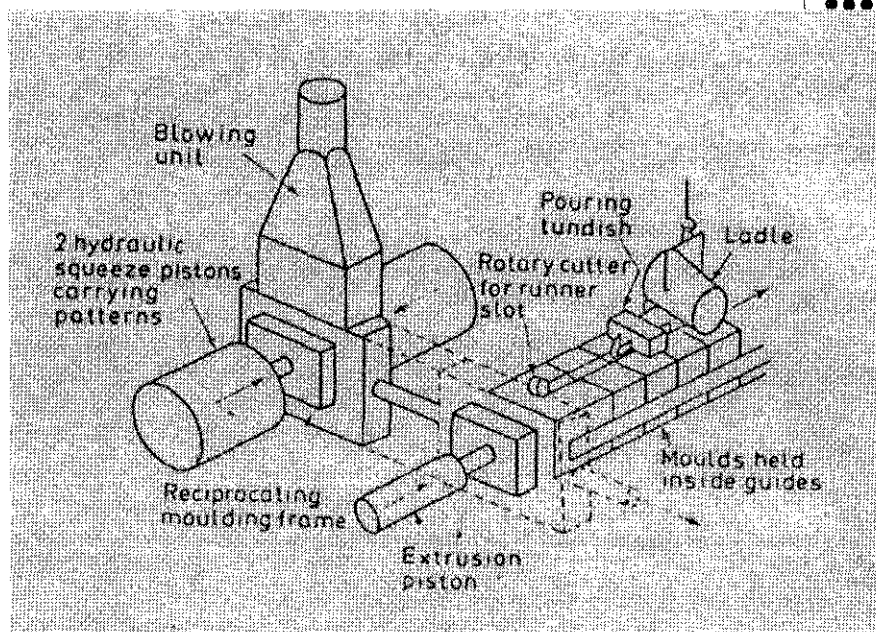
- Jolt-Squeeze-Rollover

- ใช้หลักการของ Jolt Ramming และ Squeezing ผสมกับ
- เขย่าให้ทรายแน่นก่อน แล้วพลิกหีบแบบกลับ
- อัดให้แน่น เปิดหีบแบบออกแล้วจัดวาง Core
- ใช้กับ Pattern แบบ Match-Plate

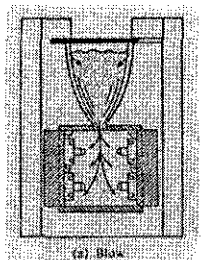
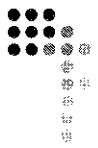


## Molding Machine

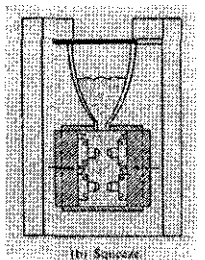
- Flaskless Molding Machine
  - ไม่มีหีบแบบ
  - เป็นกระบวนการต่อเนื่อง อัตโนมัติ เหมาะสำหรับการผลิตจำนวนมาก
  - สามารถนำทรายกลับมาใช้ใหม่ได้อัตโนมัติ โดยเมื่อโลหะแข็งตัวแล้วจะถูกทำให้ตกลงแล้วร้อนแยกชิ้นงานออก ทรายจะถูกลำเลียงกลับไปผสมใหม่



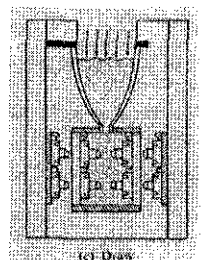




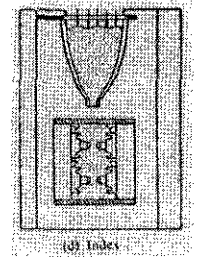
(a) Blow



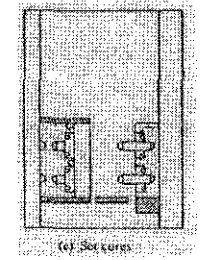
(b) Sawcut



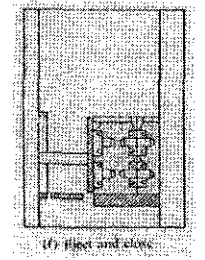
(c) Draw



(d) Index



(e) Set squares



(f) Flap and close

บทที่ 6 แบบจำลอง  
(Pattern)

## Pattern

- Pattern หรือแบบจำลองคือแบบที่มีรูปร่างเหมือนกับชิ้นงานหล่อที่ต้องการ เมื่อคำทรายให้อัดตัวรอบ Pattern แล้วเมื่อถอด Pattern ออกจะได้ทรายแบบที่มีโพรงแบบตามต้องการ
- Pattern จะมีขนาดใหญ่กว่าชิ้นงานที่ต้องการ เพื่อเผื่อสำหรับการหดตัวของโลหะ

## [ ปัจจัยในการเลือกวัสดุทำ Pattern ]

- ความต้านทานการสึกหรอ
- ความแข็งแรง
- ความยากง่ายในการ กลึง ไส ตัด เจาะ
- น้ำหนัก
- ความต้านทานการกัดกร่อน
- การขยายตัวเนื่องจากความชื้น
- ความยากง่ายในการซ่อม

## [ ไม้ ]

- ข้อได้เปรียบ
  - ราคาไม่สูง น้ำหนักเบา กลึง ไส ตัด เจาะ ง่าย
- ข้อเสียเปรียบ
  - ความต้านทานการเสียดสีต่ำ
  - ความแข็งแรงต่ำ
  - เปลี่ยนแปลงขนาดเนื่องจากความชื้น

## [ ไม้ ]

- ในไทยนิยมใช้ไม้สักทำแบบจำลอง เนื่องจากตัด เจาะ ตกแต่ง ได้ง่าย ถ้าแบบขนาดใหญ่ใช้น้อยครั้งอาจใช้ไม้ยาง
- ในต่างประเทศใช้ไม้สน หรือไม้มะฮอกกานี

## [ โลหะ ]

- ข้อได้เปรียบ
  - ไม่คูดความชื้นจากทรายแบบ
  - ความแข็งแรงสูง
  - ความต้านทานการเสียดสีสูง
- ข้อเสียเปรียบ
  - ราคาแพง น้ำหนักมาก



## [ โลหะ ]

- โลหะที่นำมาทำแบบจำลองได้แก่ อะลูมิเนียม เหล็กหล่อ ทองเหลือง บรอนซ์
- อะลูมิเนียมมีจุดหลอมตัวต่ำ หลอมง่าย น้ำหนักเบา ต้านทานการกัดกร่อนปานกลาง แข็งแรงพอสมควร

## [ พอลิเมอร์ ]

- ข้อได้เปรียบ
  - น้ำหนักเบา ไม่ดูดซึมน้ำ ยืดหยุ่น จุดหลอมตัวต่ำ
- ข้อเสียเปรียบ
  - แพง
  - ความแข็งแรงต่ำกว่าโลหะ แต่ดีกว่าไม้
  - ความต้านทานการเสียดสีต่ำกว่าโลหะ แต่ดีกว่าไม้

## [ พอลิเมอร์ ]

- ส่วนใหญ่ได้แก่ Thermosetting เช่น Phenolic resin
- ทำแบบจำลองได้ง่าย โดยการหล่อใน Plaster mold ได้ เนื่องจากมีจุดหลอมต่ำ

## [ Plaster ]

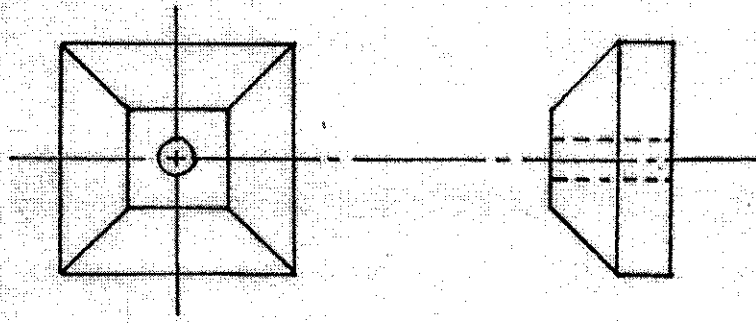
- ข้อได้เปรียบ
  - หล่อเป็นแบบจำลองได้ง่าย
  - ขยายตัวขณะแข็ง ทำให้ชดเชยการหดตัวของน้ำโลหะไปโดยปริยาย
- ข้อเสียเปรียบ
  - แรกเปราะได้ง่าย
  - คุกความชื้นจากทรายแบบได้ง่าย

คุณสมบัติ	ไม้	เหล็กหล่อ	เหล็กกล้า	ทองเหลือง บรอนซ์	อลูมิเนียม	พลาสติก
ความคงทน	ไม่ดี	ดี	ดีมาก	ดีมาก	ดี	ปานกลาง
ความยากง่ายในการ ตัดเจาะ	ดีมาก	ดี	ดี	ดี	ดี	ดี
ความแข็งแรง	ไม่ดี	ดี	ดีมาก	ดี	ดี	ดี
น้ำหนัก	ดีมาก	ไม่ดี	ไม่ดี	ไม่ดี	ดี	ดี
ความคงทนต่อการ กัดกร่อน	ปานกลาง	ดี	ดี	ดีมาก	ดี	ดีมาก
การขยายตัวเมื่อ ความชื้นเปลี่ยนแปลง	ไม่ดี	ดี	ดี	ดี	ดี	ดี
ความยากง่ายในการ เชื่อม	ดีมาก	ดี	ดี	ดี	ไม่ดี	ปานกลาง

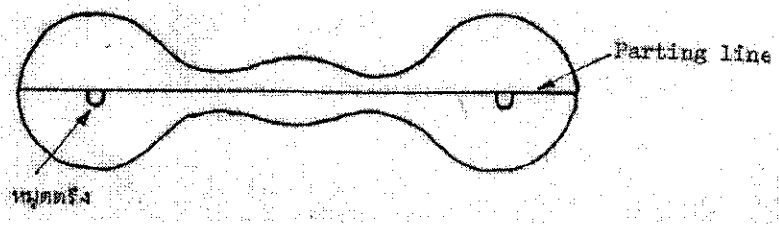
## [ ชนิดของ Pattern ]

- Single Piece Pattern
- Split Pattern
- Loose Pattern
- Match Plated Pattern
- Follow Board Pattern
- Gated Pattern
- Sweep Pattern
- Skeleton Pattern

[ Single Piece Pattern ]

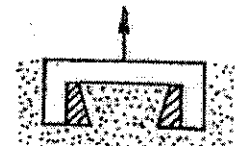
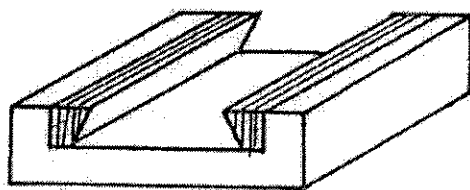


[ Split Pattern ]

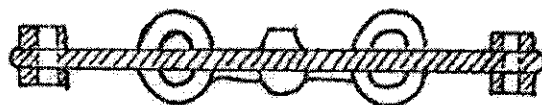
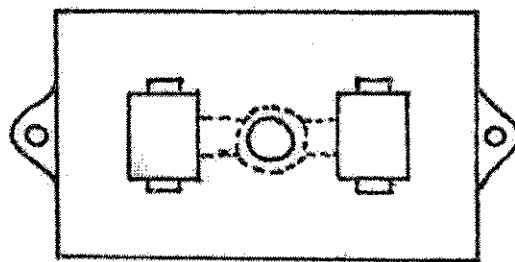




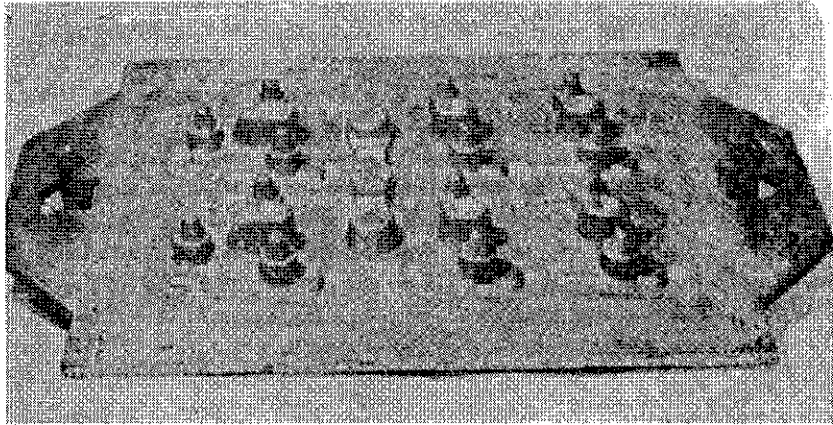
[ Loose Pattern ]



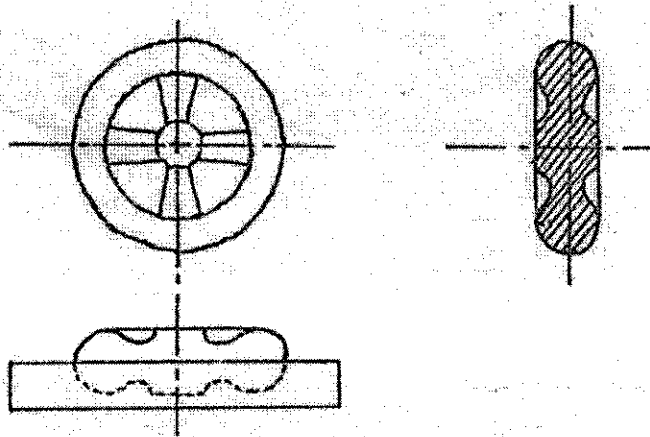
[ Match Plated Pattern ]



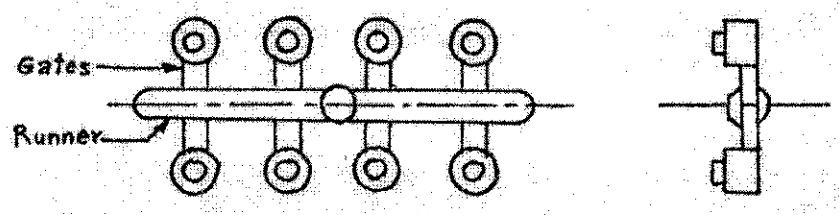
[ Match Plated Pattern ]



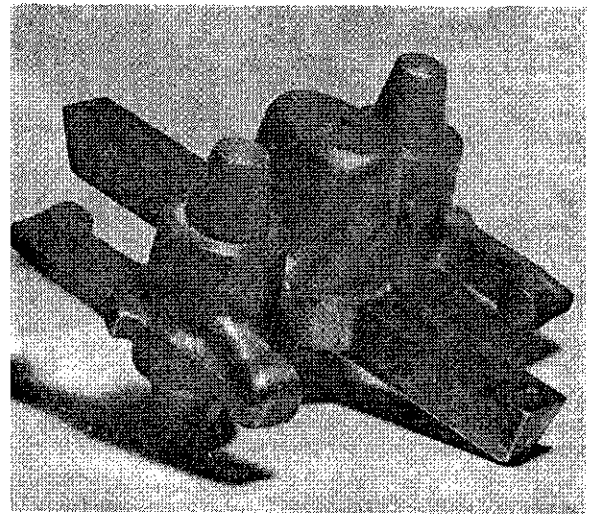
[ Follow Board Pattern ]



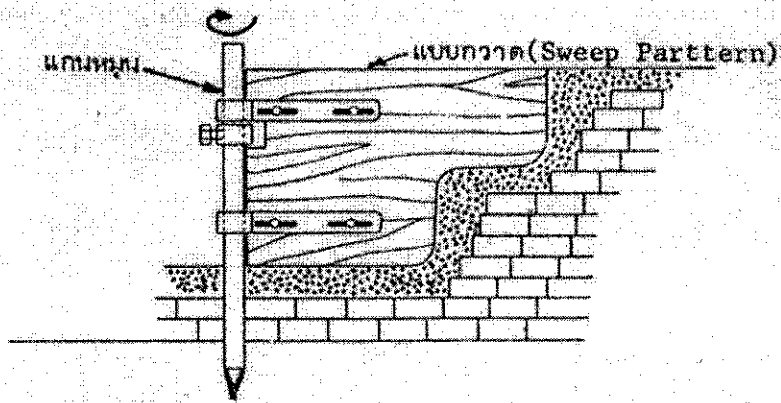
[ Gated Pattern ]



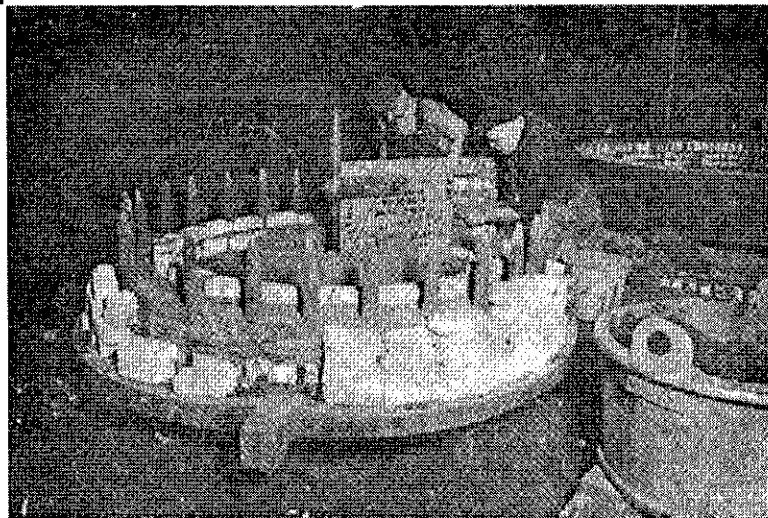
[ Gated Pattern ]



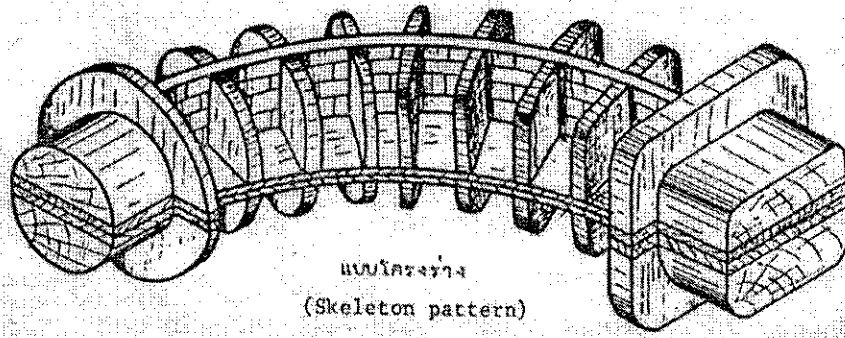
[ Sweep Pattern ]



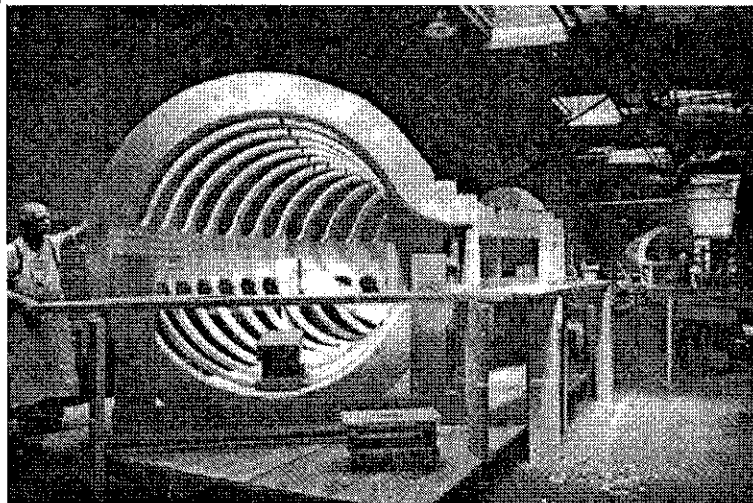
[ Sweep Pattern ]



[ Skeleton Pattern ]



[ Skeleton Pattern ]





## Pattern Allowance

- ในการสร้าง Pattern จะต้องมีการเผื่อขนาดให้ใหญ่กว่ารูปร่างชิ้นงานจริง เนื่องจากสาเหตุดังนี้
  - เพื่อชดเชยการหดตัวของโลหะ
  - เพื่อชดเชยการกลิ้งไสออก
  - เพื่อแก้ไขการถอดแบบยาก
  - อื่น ๆ

## Pattern Allowance - ส่วนขยายเพื่อชดเชยการหดตัว

- การหดตัวของโลหะ แบ่งออกเป็น 3 ชั้น
  - การหดตัวของน้ำโลหะ
  - การหดตัวขณะเปลี่ยนแปลงเป็นของแข็ง
  - การหดตัวในสภาวะของแข็ง
- การหดตัวในสภาวะของแข็งเท่านั้นที่เกี่ยวข้องกับส่วนขยาย

[ Pattern Allowance - ส่วนขยายเพื่อชดเชยการหดตัว ]

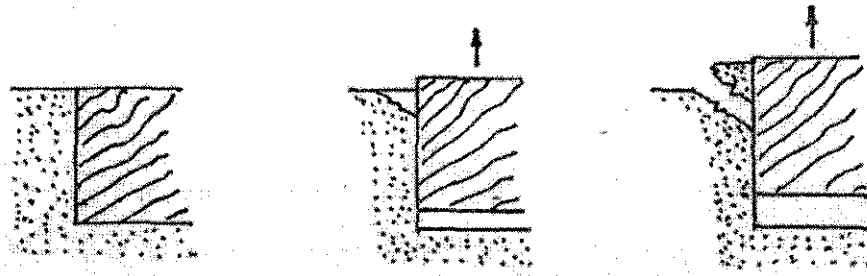
เหล็กหล่อเทา	ชิ้นงานหล่อบาง	10 mm/m
	ชิ้นงานหล่อหนา	7-8 mm/m
เหล็กกล้า	ชิ้นงานขนาดเล็ก	18-20 mm/m
	ชิ้นงานขนาดใหญ่	12-15 mm/m
เหล็กหล่อขาว		18-20 mm/m
Bronze		15-18 mm/m
Brass		15-18 mm/m
Aluminium		12-14 mm/m
Lead		24 mm/m

[ Pattern Allowance - ส่วนขยายเพื่อชดเชยการกลิ้ง ]

- เป็นการขยายขนาดของแบบจำลองเฉพาะค้ำที่จะต้องมีการกลิ้งหรือไสออก ซึ่งจะต้องมีการเผื่อขนาดความหนาไว้ ขึ้นอยู่กับความเร็วของพื้นผิวที่ต้องการ
- โดยทั่วไปเผื่อขนาดไว้ 3 - 18 mm

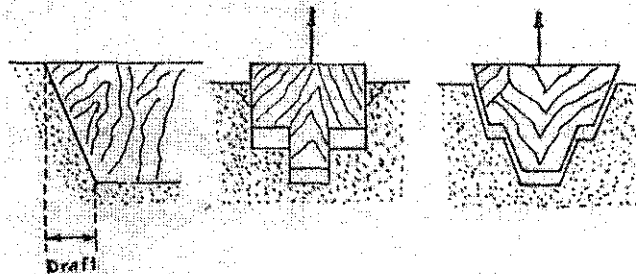
## Pattern Allowance - ส่วนขยายเพื่อแก้ไขการถอดแบบยาก

- ส่วนของแบบที่ลึกลงไปในทรายแบบจะถอดได้ยาก
- โดยเฉพาะในกรณีที่แบบจำลองลึกลงไปในแบบมาก ทรายแบบที่บริเวณมุมมีโอกาสที่จะพังติดแบบออกมาสูง



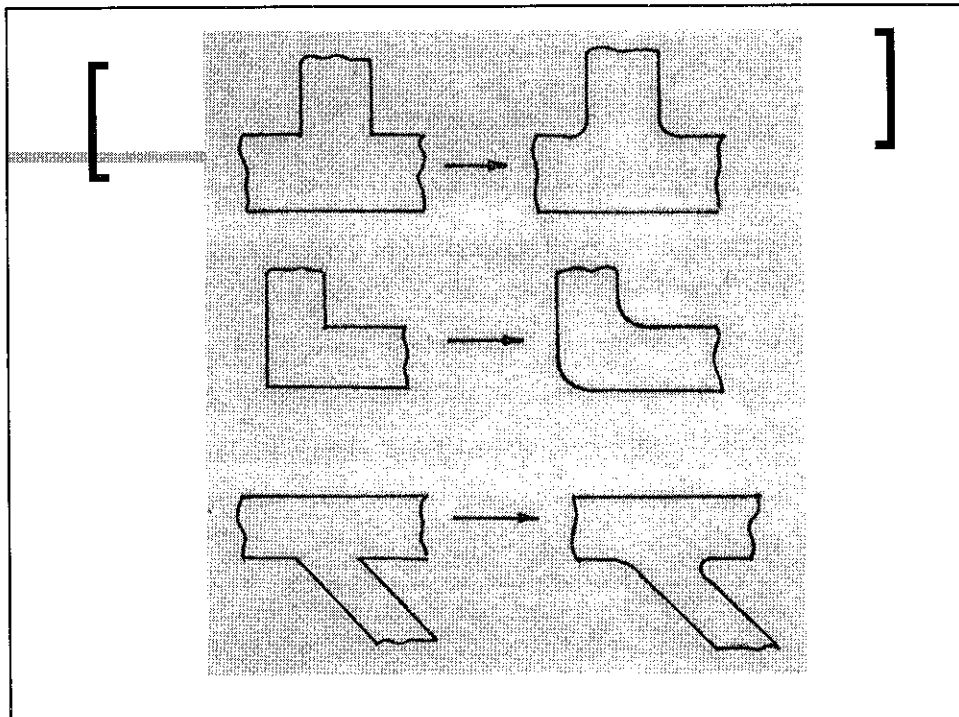
## Pattern Allowance - ส่วนขยายเพื่อแก้ไขการถอดแบบยาก

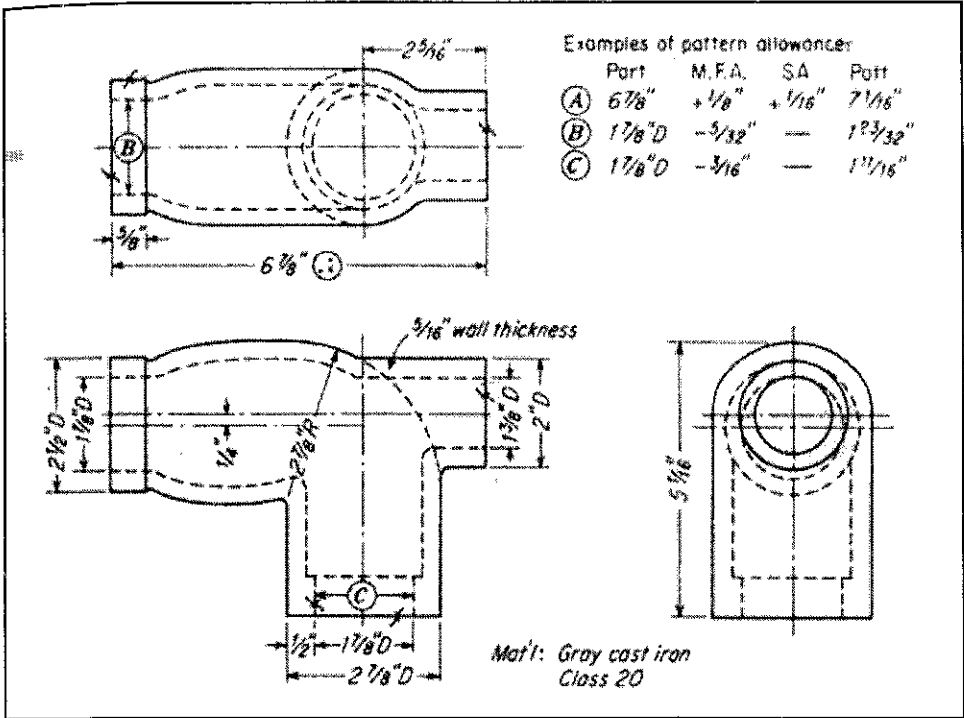
- เพื่อแก้ไขจึงทำให้ผิวของ Pattern เอียงเล็กน้อยเรียกว่า "Draft"
- โดยทั่วไป Draft มีค่าประมาณ 10 - 20 mm/m
- ในกรณีของรู Draft อาจมีค่าสูงถึง 60 mm/m
- สำหรับเครื่องทำแบบทราย Draft ประมาณ 10 - 50 mm/m



[ Pattern Allowance - อื่น ๆ ]

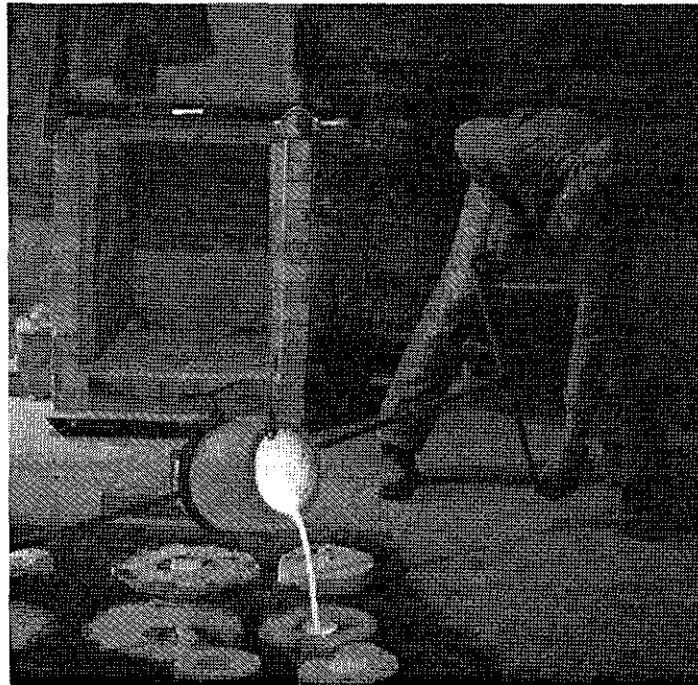
- สาเหตุอื่นในการเพิ่มส่วนขยายได้แก่
  - เพื่อแก้ปัญหา Thermal Stress
  - เพื่อแก้ปัญหาการไหลของน้ำโลหะ
  - เพื่อแก้ปัญหาการเกิด Internal Shrinkage



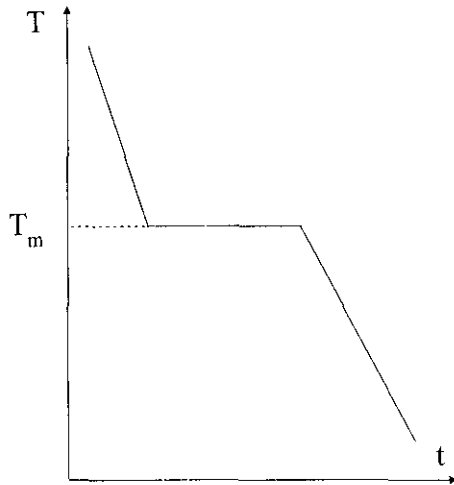




## บทที่ 7 Solidification of Casting



## การแข็งตัวของโลหะบริสุทธิ์



ในกรณีที่ความดันคงที่

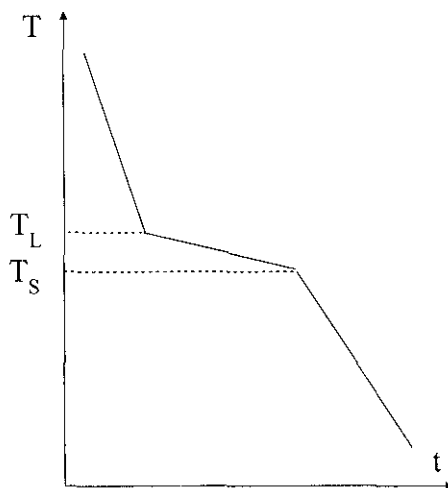
$$F = C - P + 1$$

$$F = 1 - 2 + 1$$

$$= 0$$

หมายความว่าในขณะที่โลหะแข็งตัวจะไม่มี การเปลี่ยนแปลงตัวแปร (อุณหภูมิ)

## การแข็งตัวของโลหะผสม



ในกรณีที่ความดันคงที่

$$F = C - P + 1$$

$$F = 2 - 2 + 1$$

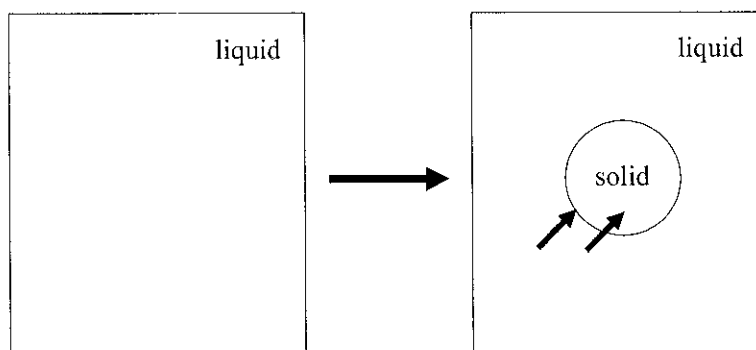
$$= 1$$

หมายความว่าในขณะที่โลหะแข็งตัวจะมีการเปลี่ยนแปลงตัวแปร (อุณหภูมิ) ได้ ยกเว้นกรณีที่ เกิดปฏิกิริยา (Eutectic, Peritectic)

การแข็งตัวของโลหะแบ่งออกเป็น 2 ช่วง

- Nucleation
  - Homogeneous nucleation
  - Heterogeneous nucleation
- Growth

### Homogeneous Nucleation



ทั้งสองภาพนี้มีส่วนแตกต่างกันอยู่ 2 ประการคือ  
1) พื้นที่ผิว และ 2) ปริมาตรเฟสของแข็งที่เกิดขึ้น

ปริมาตร

$$\Delta G_V = \frac{4}{3} \pi r^3 \Delta G_v \quad \left[ \frac{J}{m^3} \right]$$

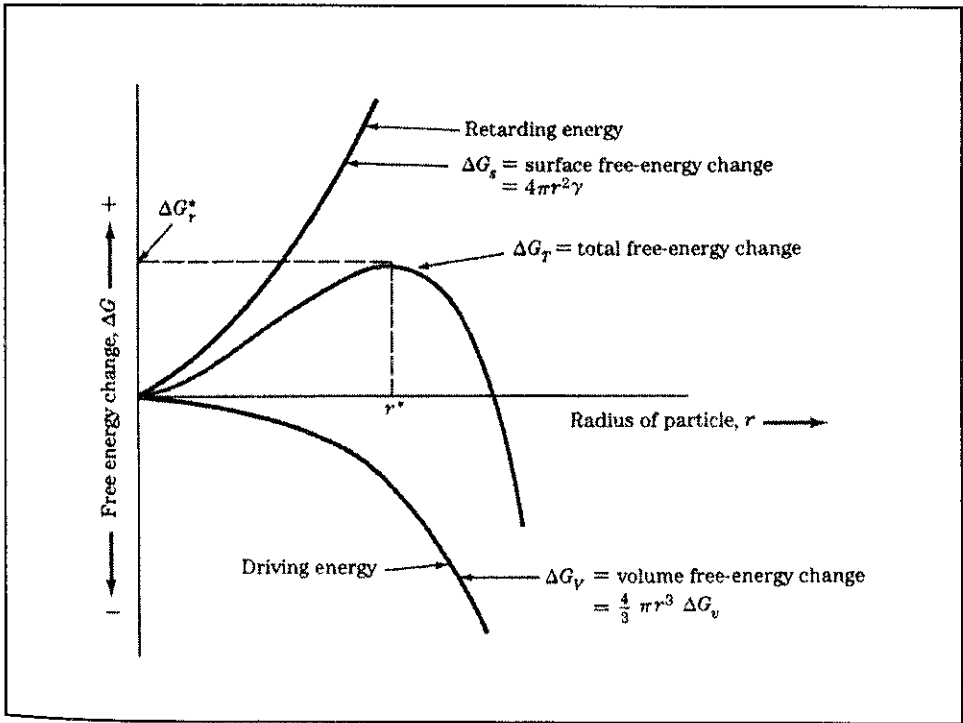
ค่าพลังงานต่อหน่วยปริมาตร

พื้นที่ผิว

$$\Delta G_S = 4\pi r^2 \gamma \quad \left[ \frac{J}{m^2} \right]$$

ค่าพลังงานต่อหน่วยพื้นที่

พลังงานรวมที่เปลี่ยนแปลงไป [J]

$$\begin{aligned} \Delta G_T &= \Delta G_V + \Delta G_S \\ &= \frac{4}{3} \pi r^3 \Delta G_v + 4\pi r^2 \gamma \end{aligned}$$


$r^*$  can be determined by condition  $\frac{d(\Delta G_T)}{dr} = 0$

$$\frac{d(\Delta G_T)}{dr} = \frac{d}{dr} \left( \frac{4}{3} \pi r^3 \Delta G_v + 4\pi r^2 \gamma_{s-l} \right) = 0$$

$$= \frac{12}{3} \pi r^2 \Delta G_v + 8\pi r \gamma_{s-l} = 0$$

$$= 4\pi r^2 \Delta G_v + 8\pi r \gamma_{s-l}$$

$$- 4\pi r^2 \Delta G_v = 8\pi r \gamma_{s-l}$$

$$\frac{r^2}{r} = - \frac{8\pi \gamma_{s-l}}{4\pi \Delta G_v}$$

$$r = - \frac{2\gamma_{s-l}}{\Delta G_v}$$

ระบบพยายามที่จะลดพลังงานรวมลง ( $\Delta G_T$ ) ดังนั้นถ้ารัศมีของของแข็งที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยกว่ารัศมีวิกฤต ( $r^*$ ) ระบบจะลดพลังงานลงโดยลดค่า  $r$  หรือสลายตัวไปนั่นเอง แต่ถ้าของแข็งที่เกิดขึ้นมีรัศมีมากกว่า  $r^*$  ระบบจะลดพลังงานลงโดยการเพิ่มค่า  $r$  หรือขยายตัวนั่นเอง

$$r < r^* \longrightarrow r \downarrow$$

$$r > r^* \longrightarrow r \uparrow \longrightarrow \text{Growth}$$



$$r = -\frac{2\gamma}{\Delta G_v} = r^*$$

ค่า  $\Delta G_v$  ขึ้นอยู่กับขนาดของ undercooling

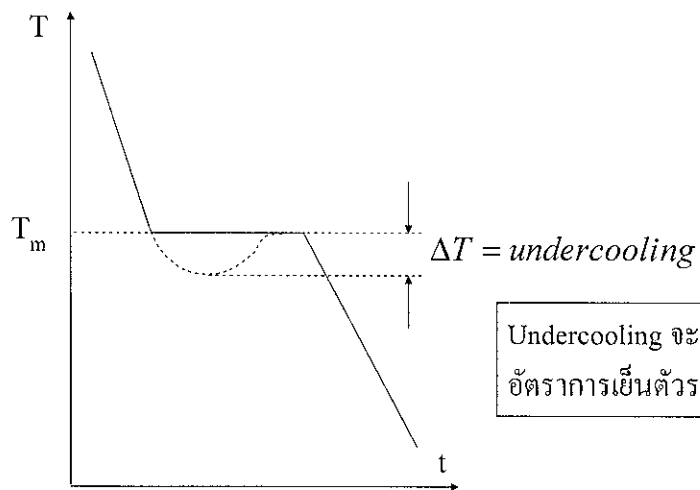
$\Delta T = \text{undercooling}$

$$\Delta G_v = \frac{\Delta T}{T_m} L$$

ความร้อนแฝงในการเปลี่ยนสถานะ

$$r^* = -\frac{2\gamma T_m}{L\Delta T}$$

## Undercooling



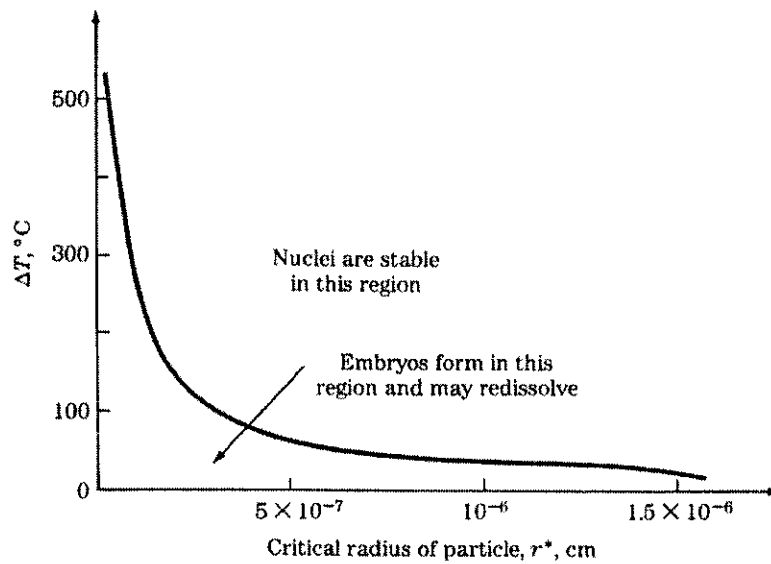
Undercooling จะมากขึ้นเมื่อ  
อัตราการเย็นตัวรวดเร็วขึ้น

$$r^* = -\frac{2\gamma T_m}{L\Delta T}$$

$$\uparrow \Delta T \longrightarrow r^* \downarrow$$

$$\downarrow \Delta T \longrightarrow r^* \uparrow$$

ค่า  $r^*$  เป็นค่าที่บอกว่าถ้าของแข็งที่เกิดขึ้นมีค่า  $r$  มากกว่านี้จะสามารถ growth ต่อไปได้ เพราะฉะนั้นยิ่งค่า  $r^*$  น้อย ยิ่งเกิด nucleation ได้ง่าย  $\longrightarrow$  growth ดังนั้นยิ่ง undercooling มาก nucleus ที่เกิดขึ้นยิ่งเยอะ



By substituting  $r^*$  into  $\Delta G_r$  equation we get,

$$\Delta G^* = \frac{16}{3} \frac{\pi r^3}{\Delta G_v^2}$$

From statistical thermodynamics,

$$\Delta S_{mix} = k \ln \frac{(n_0 + n_r)!}{n_0! n_r!}$$

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S$$

$$= n_r \Delta G_r - kT [(n_0 + n_r) \ln(n_0 + n_r) - n_0 \ln n_0 - n_r \ln n_r]$$

At equilibrium,  $\left( \frac{\partial \Delta G}{\partial n_r} \right)_T = 0$

$$\Delta G = kT \ln \left( \frac{n_r}{n_0 + n_r} \right)$$

$$\Delta G = kT \ln \left( \frac{n_r}{n_0 + n_r} \right)$$

If  $n_0 \gg n_r$

$$\frac{n_r}{n_0} = \exp \left( - \frac{\Delta G}{kT} \right)$$

Where  $n_r$  is number of nuclei formed  
 $n_0$  is number of particle/unit volume

$$n_0 = \frac{N_A}{V}$$

Example

Calculate number of nucleus in Ni at its melting point, 1725 K. If  $r = 7 \text{ \AA}$

DATA:

$$T_m = 1725 \text{ K}$$

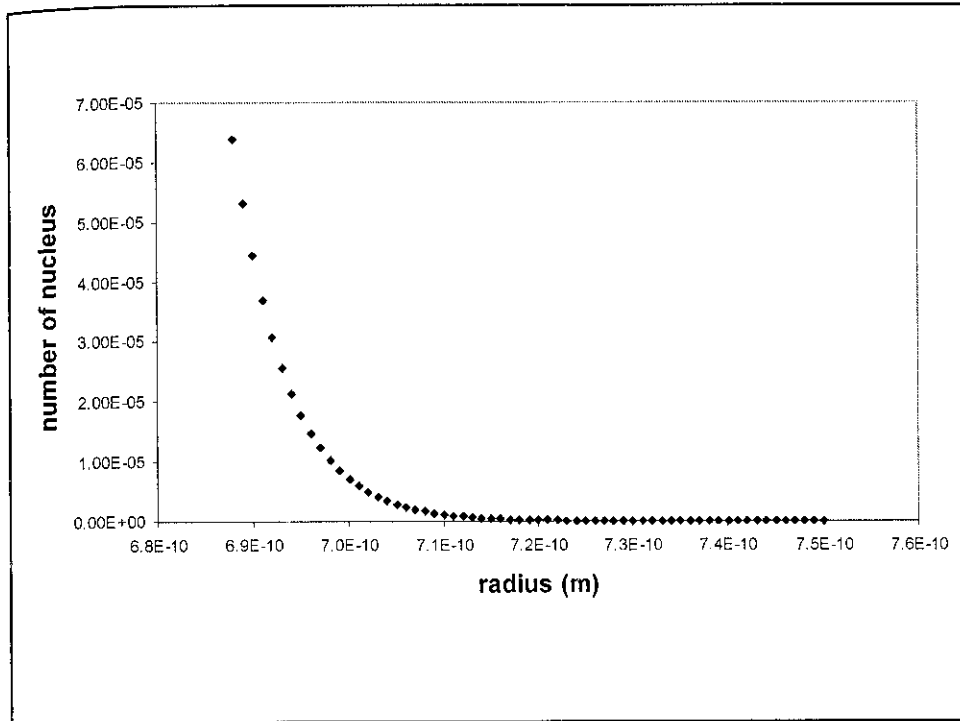
$$\frac{L}{T_m} = 10 \frac{\text{J}}{\text{mol.K}}$$

$$\gamma_{s-l} = 0.25 \frac{\text{J}}{\text{m}^2}$$

$$\underline{V} = 7 \times 10^{-6} \frac{\text{m}^3}{\text{mol}} \longrightarrow n_0 = \frac{N_A}{\underline{V}} = 8.6 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$$

$$\begin{aligned} \Delta G &= 4\pi r^3 \Delta G_v^* + 4\pi r^2 \gamma_{s-l} & \Delta G_v &= \frac{1}{\underline{V}} \frac{L}{T_m} (T - T_m) \\ &= 4\pi r^2 \gamma_{s-l} \\ &= 4\pi (7 \times 10^{-10})^2 (0.25) \\ &= 1.54 \times 10^{-18} \text{ J} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} n_v &= n_0 \exp\left(-\frac{\Delta G}{kT}\right) \\ &= (8.6 \times 10^{22}) \exp\left(-\frac{1.54 \times 10^{-18}}{(1.38 \times 10^{-23})(1725)}\right) \\ &= 7.08 \times 10^{-6} \frac{\text{nucleus}}{\text{cm}^3} \end{aligned}$$

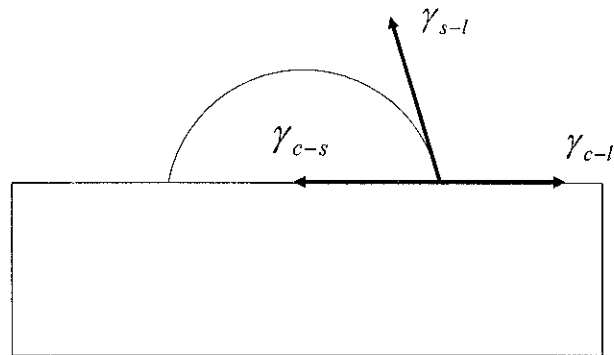


## Heterogeneous Nucleation

- คือ nucleation ที่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อหรือรอบ ๆ พื้นผิวข้างเคียง เช่น ผลึกน้ำแข็งเกาะตามบริเวณขอบแก้ว, โลหะแข็งตัวตามผนังแบบหล่อ
- ทฤษฎีเหมือนกับ homogeneous nucleation คือมีการสร้างพื้นผิวและปริมาตรใหม่ แต่ว่า heterogeneous nucleation มีการสร้างพื้นผิวใหม่น้อยกว่า ทำให้เป็นไปได้มากกว่า homogeneous nucleation



## Heterogeneous Nucleation



Liquid-solid surface

$$2\pi r^2(1 - \cos \theta)$$

Catalyst-solid surface

$$\pi r^2(1 - \cos^2 \theta)$$

$$\Delta G_S = 2\pi r^2(1 - \cos \theta)\gamma_{s-l} + \pi r^2(1 - \cos^2 \theta)(\gamma_{c-s} - \gamma_{c-l})$$

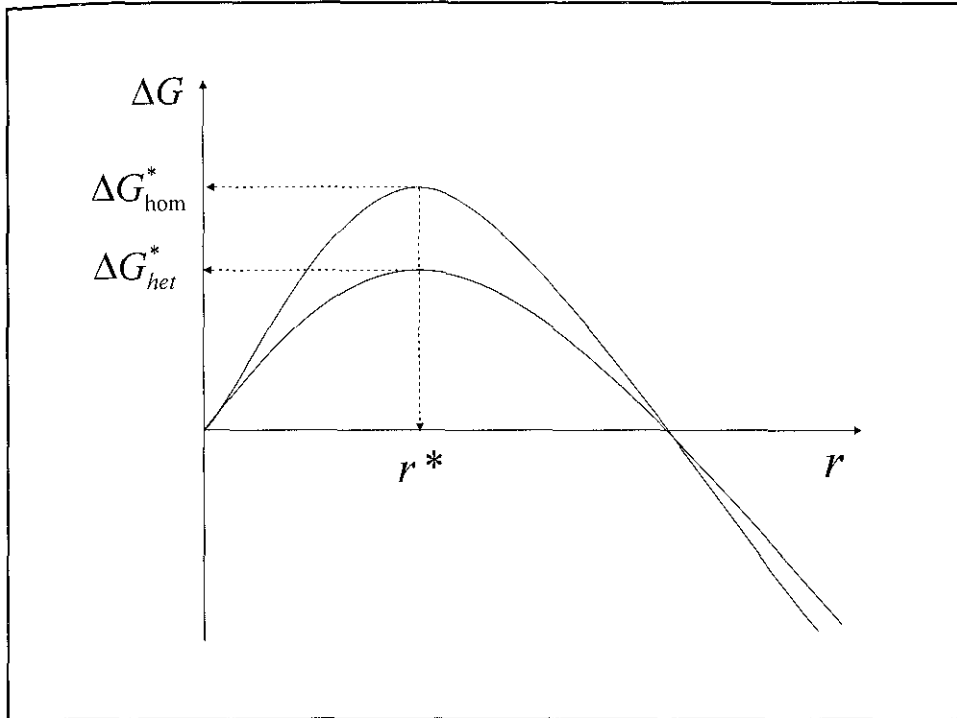
$$V = \frac{4}{3} \pi r^3 \underbrace{\left\{ \frac{(2 + \cos \theta)(1 - \cos \theta)^2}{4} \right\}}_{f(\theta)}$$

$$V = \frac{4}{3} \pi r^3 f(\theta)$$

$$r^* = -\frac{2\gamma_{s-l}}{\Delta G_v}$$

$$\Delta G_{vol} = \frac{4}{3} \pi r^3 f(\theta) \Delta G_v$$

$$\Delta G^* = \frac{16}{3} \frac{\pi \gamma_{s-l}^3}{\Delta G_v^2} f(\theta)$$



Nucleation ที่เกิดขึ้นในงานหล่อส่วนใหญ่เป็นแบบ Heterogeneous nucleation โดยที่ค่า undercooling มีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 0.1 – 10 K เท่านั้น

ตัวอย่างของ heterogeneous nucleation นอกเหนือที่เกี่ยวกับทางโลหะได้แก่ โครงการพระราชดำริฝนหลวง หรือ รู้จักกันในชื่อ “ฝนเทียม” มีการใช้  $\text{CaCl}_2$  เป็น heterogeneous nuclei แล้วจึงใช้สารเย็นจัดเช่น น้ำแข็งแห้ง, Silver Iodine เป็นตัวทำให้เกิด nucleation

$\text{CaCl}_2$  → ลดพื้นที่ผิวที่ต้องสร้าง  
 น้ำแข็งแห้ง/Silver Iodine → เพิ่ม  $\Delta T$

**Rate of nucleation**

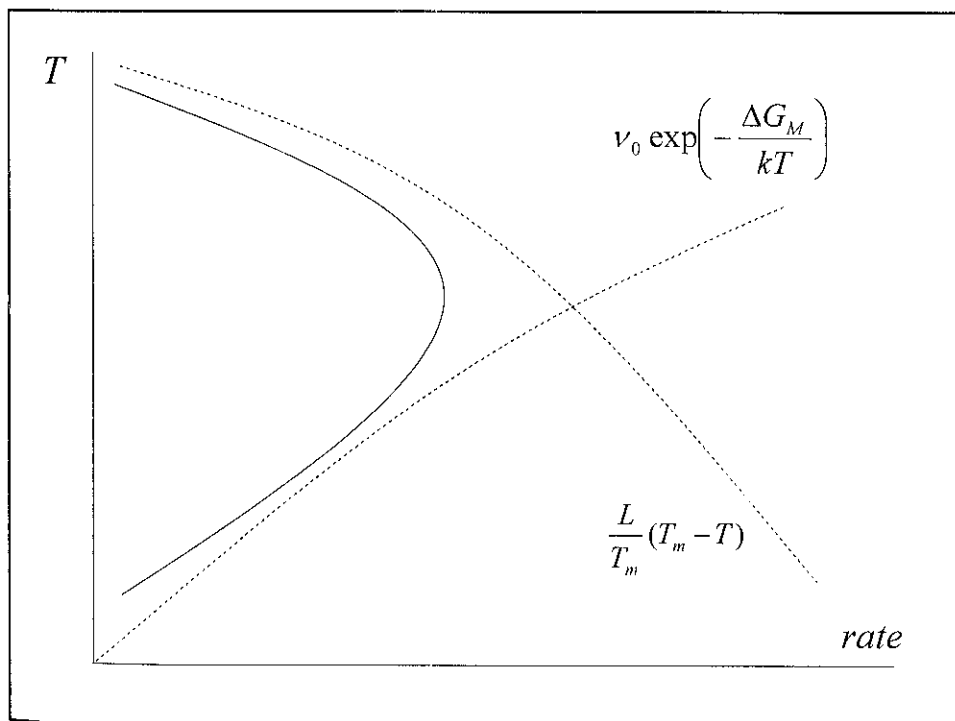
$$v = v_0 \exp\left(-\frac{\Delta G_M}{kT}\right) \quad [1]$$

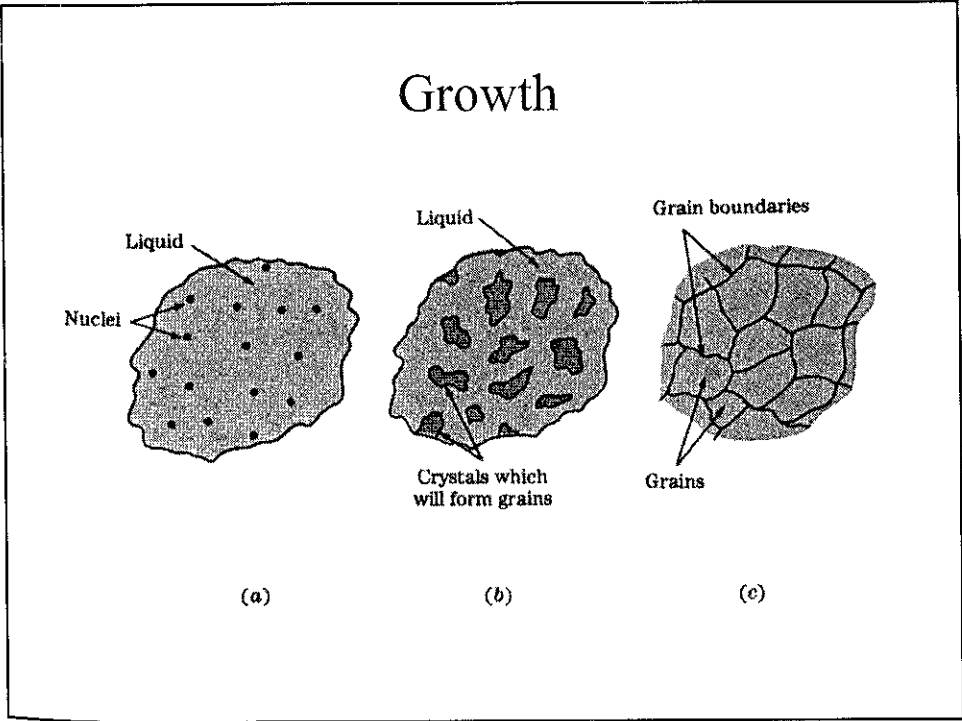
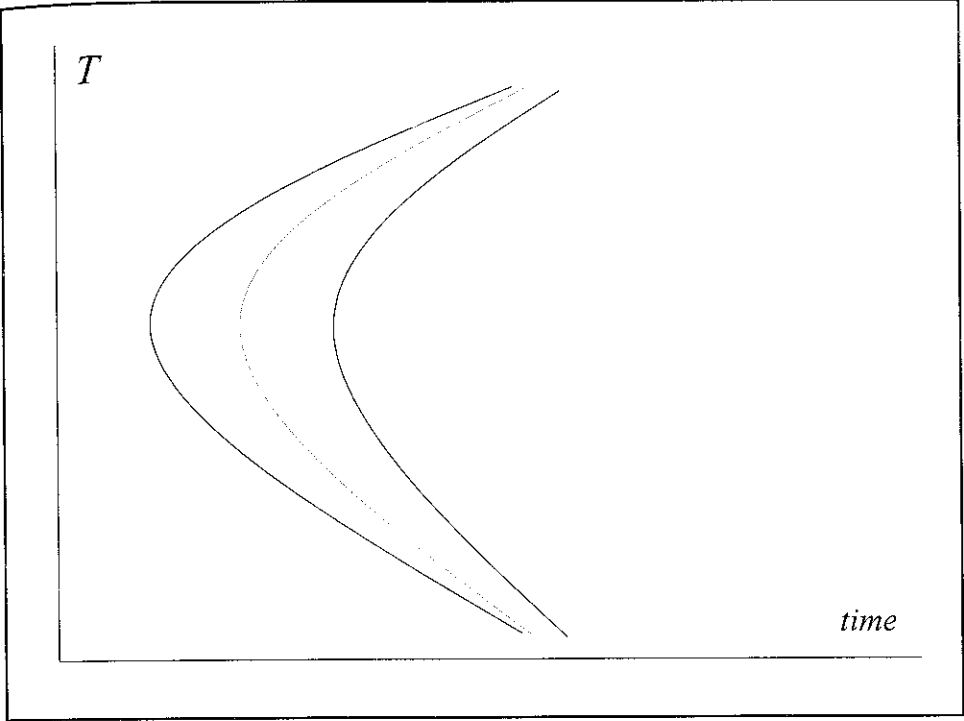
Jump frequency of atom
Activation energy for movement of atom

Jump frequency at the surface

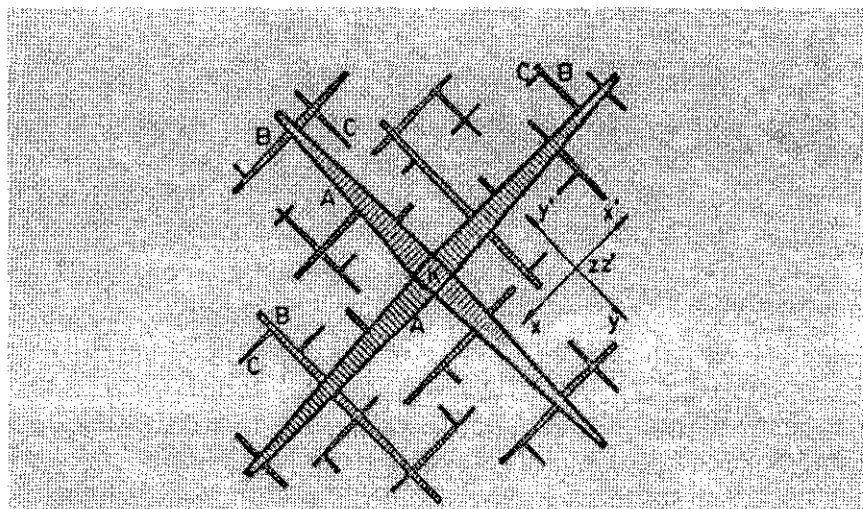
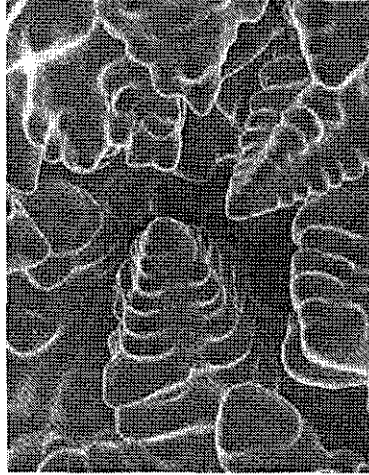
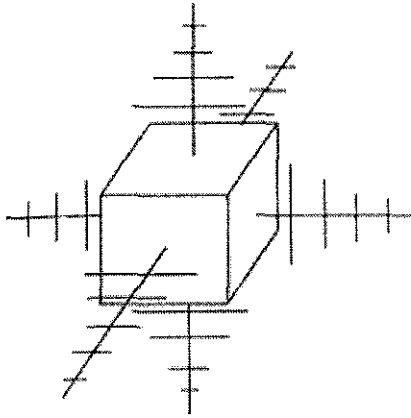
$$\Delta G = \frac{L}{T_m}(T_m - T) \quad [2]$$

Solidification rate = [1] x [2]

$$= v_0 \exp\left(-\frac{\Delta G_M}{kT}\right) \left(\frac{L}{T_m}\right) (T_m - T)$$


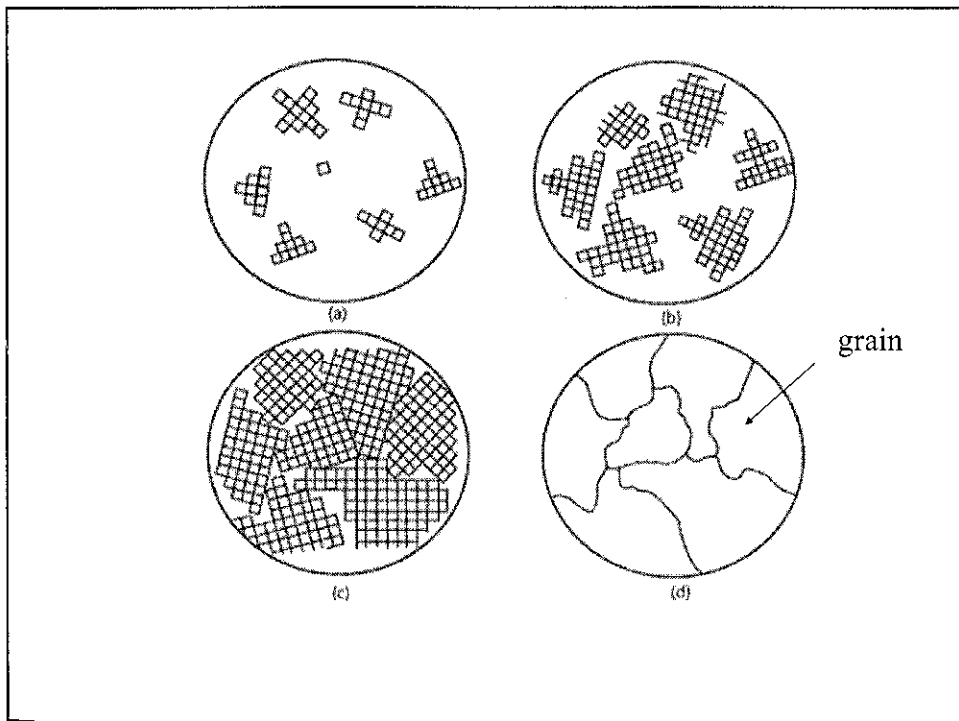
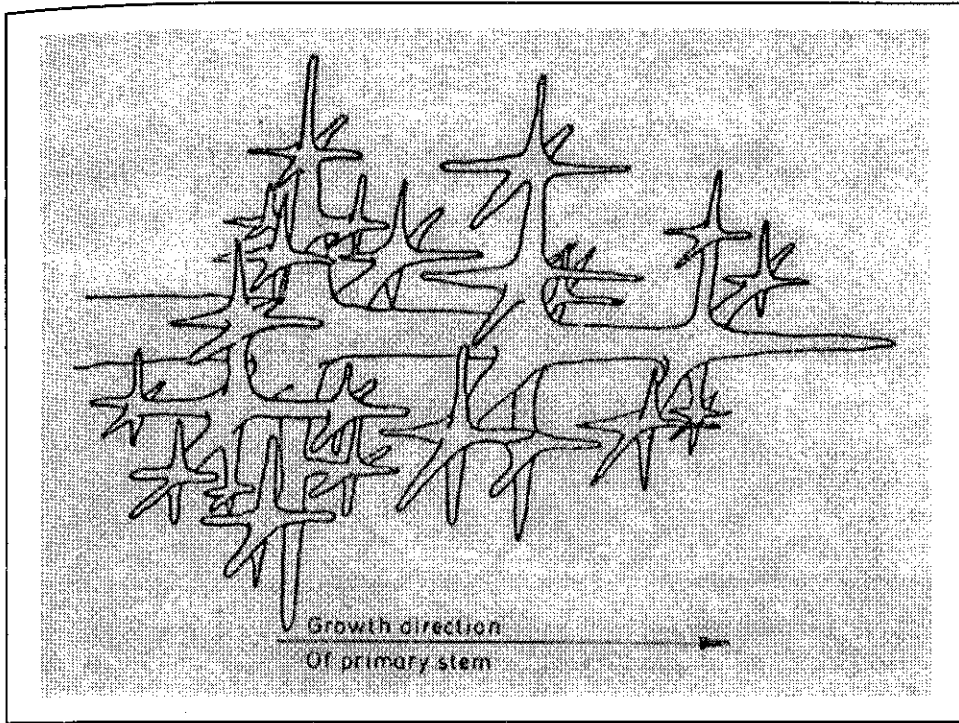


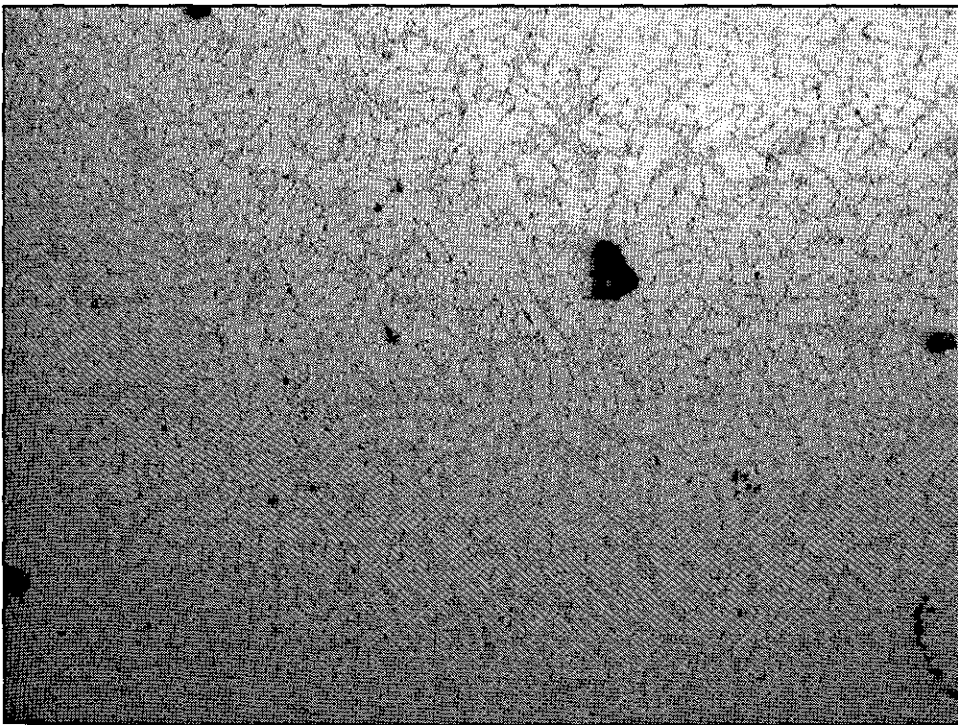
“Dendrite”

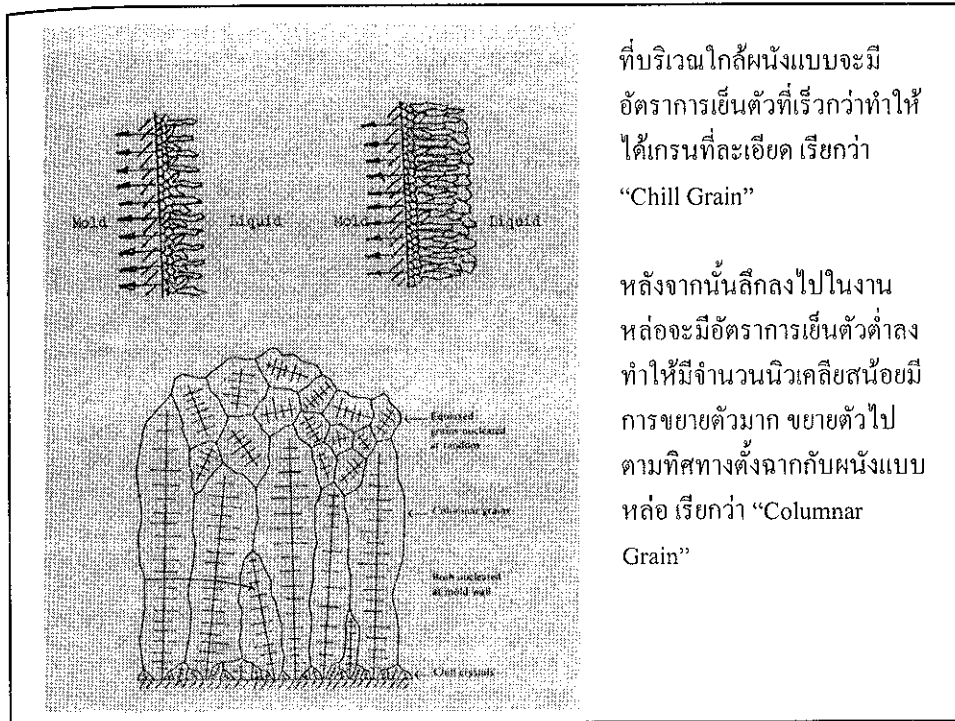


ภาพที่ 7.6 แสดงลักษณะการเกิดของโครงข่าย Dendrite





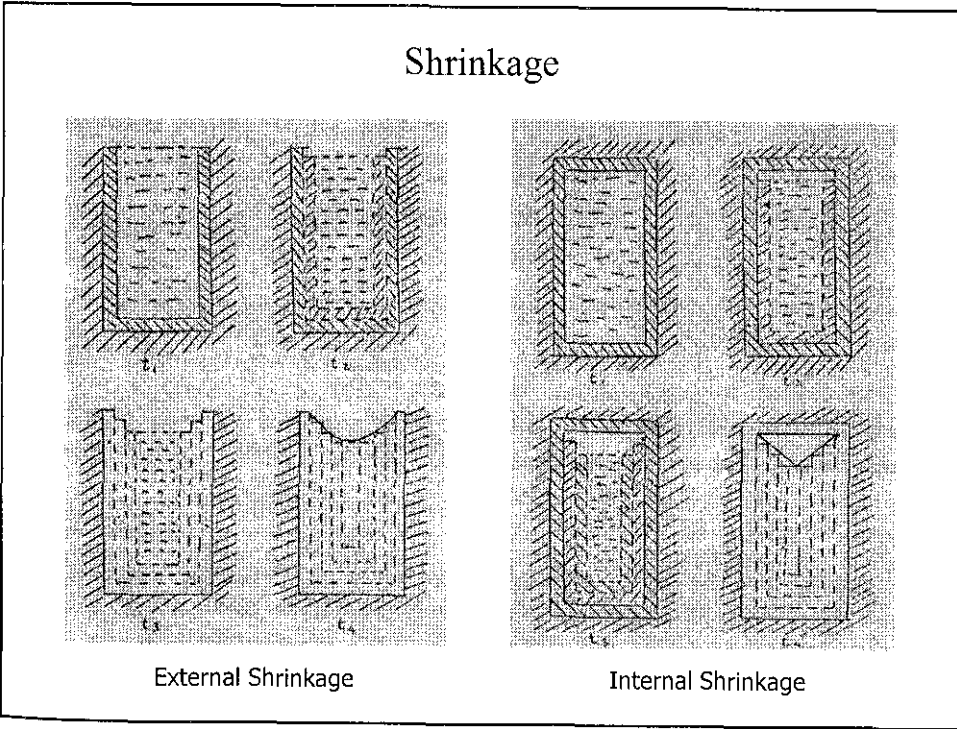
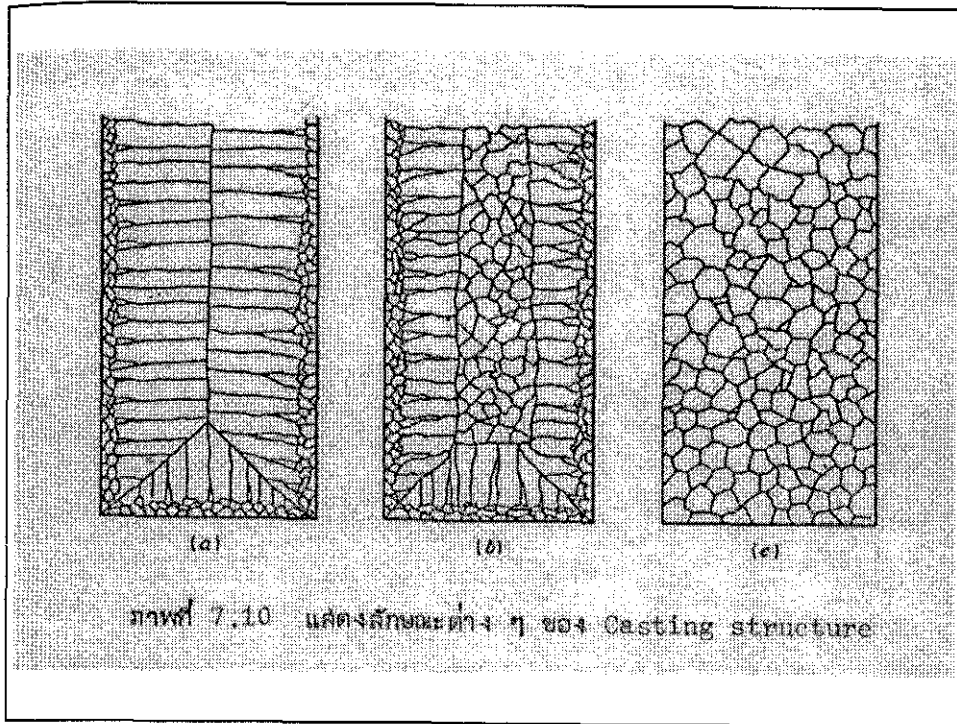




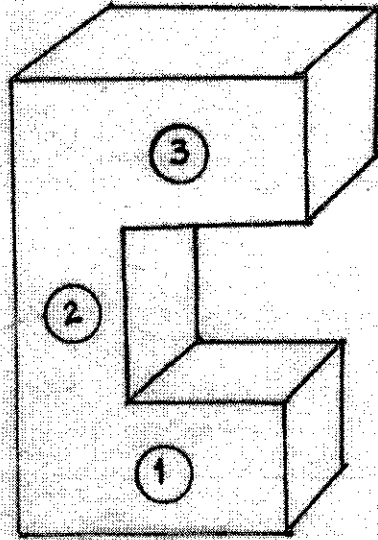
ที่บริเวณใกล้ผนังแบบจะมี อัตราการเย็นตัวที่เร็วกว่าทำให้ ได้เกรนที่ละเอียด เรียกว่า “Chill Grain”

หลังจากนั้นลึกลงไปในงาน หล่อจะมีอัตราการเย็นตัวต่ำลง ทำให้มีจำนวนนิวเคลียสน้อยมี การขยายตัวมาก ขยายตัวไป ตามทิศทางตั้งฉากกับผนังแบบ หล่อ เรียกว่า “Columnar Grain”

- หลังจากนั้นเมื่อโลหะแข็งตัวมากขึ้น จะหดตัวและเกิดช่องว่างระหว่าง ชิ้นงานกับผนังแบบ เป็นฉนวนความร้อน ทำให้การถ่ายเทความร้อน ใกล้เคียงกัน ในแต่ละทิศทาง จึงได้เกรนขนาดใหญ่ที่ไม่ขึ้นอยู่กับการทิศทาง เรียกว่า “Equiaxed Grain”
- สุดท้ายทำให้โครงสร้างของงานหล่อดีมีความไม่สม่ำเสมอ บริเวณที่เป็น Chill Grain ก็จะมี ความแข็งแรงมาก บริเวณที่เป็น Columnar Grain ก็จะมี ความแข็งแรงไม่เท่ากันทุกทิศทาง บริเวณที่เป็น Equiaxed Grain” จะมีความแข็งแรงต่ำกว่า Chill Grain
- เพื่อปรับปรุงให้โครงสร้างละเอียดจึงทำ Inoculation, Modification, Grain refinement



### Directional Solidification



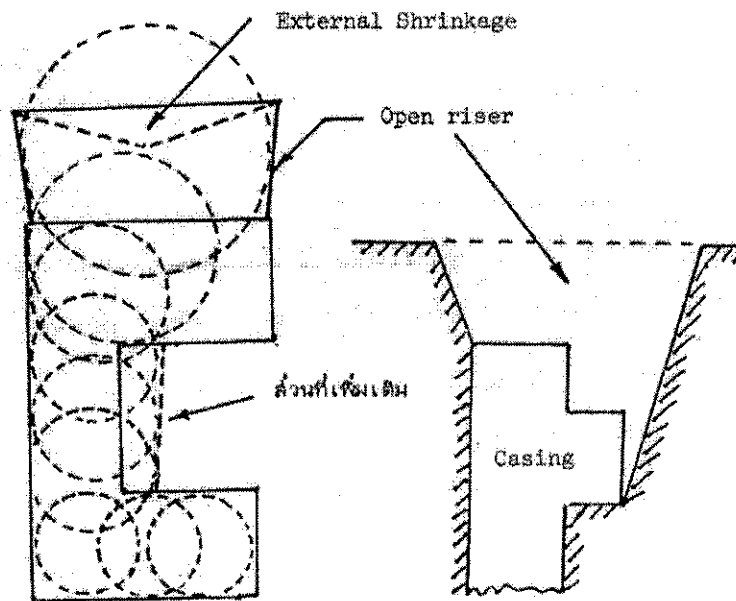
จะเห็นว่าส่วน 2 มีความหนา  
น้อยกว่าบริเวณอื่นและจะเกิด  
การแข็งตัวก่อน

2 → 1 → 3

เมื่อส่วนที่ 1 เกิดการแข็งตัวจะ  
เกิดการหดตัวและไม่มีน้ำโลหะ  
ไหลเข้ามาทดแทน จึงเกิด

Shrinkage cavity ขึ้น

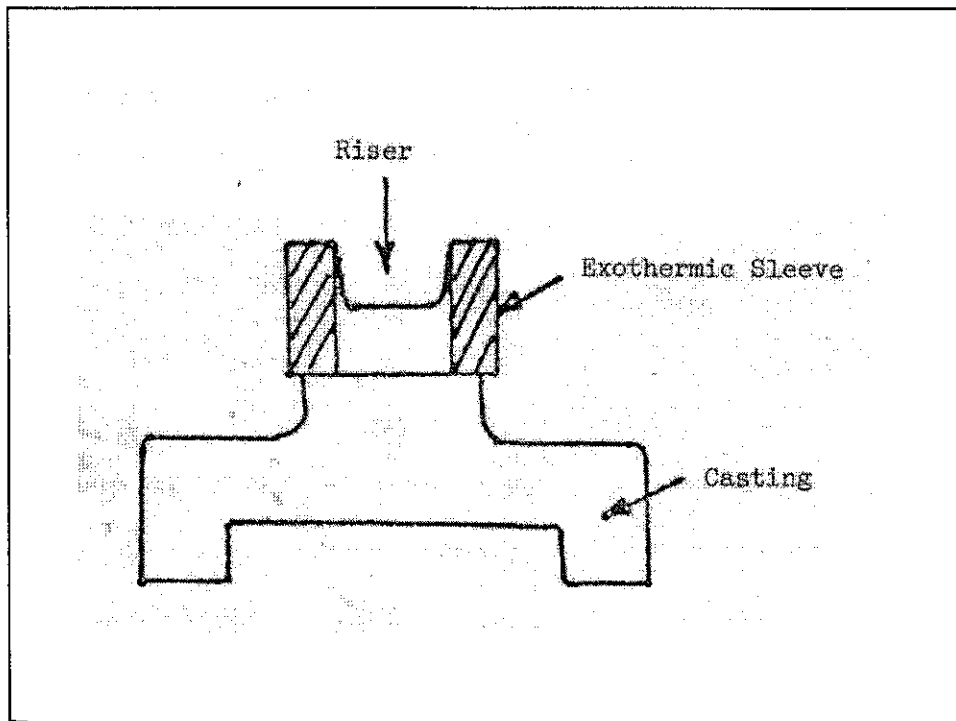
วิธีแก้ไขคือต้องทำให้เกิดลำดับ  
การแข็งตัวจาก 1 → 2 → 3



## ประเภทของ Riser

### ■ Open riser

- เป็น riser ที่เปิดทางด้านบนติดกับบรรยากาศ
- ด้านบนอาจเกิด Solid film เนื่องจากมี Radiation และทำให้โลหะด้านบนแข็งตัวก่อน ทำให้น้ำโลหะไม่ไหลไปเต็มในแบบ เพราะเกิดสุญญากาศภายใน riser
- แก้ไขโดยใช้ Exothermic compound และ Exothermic sleeve ให้ความร้อนแก่ riser ทำให้เป็นจุดสุดท้ายที่เกิดการแข็งตัว

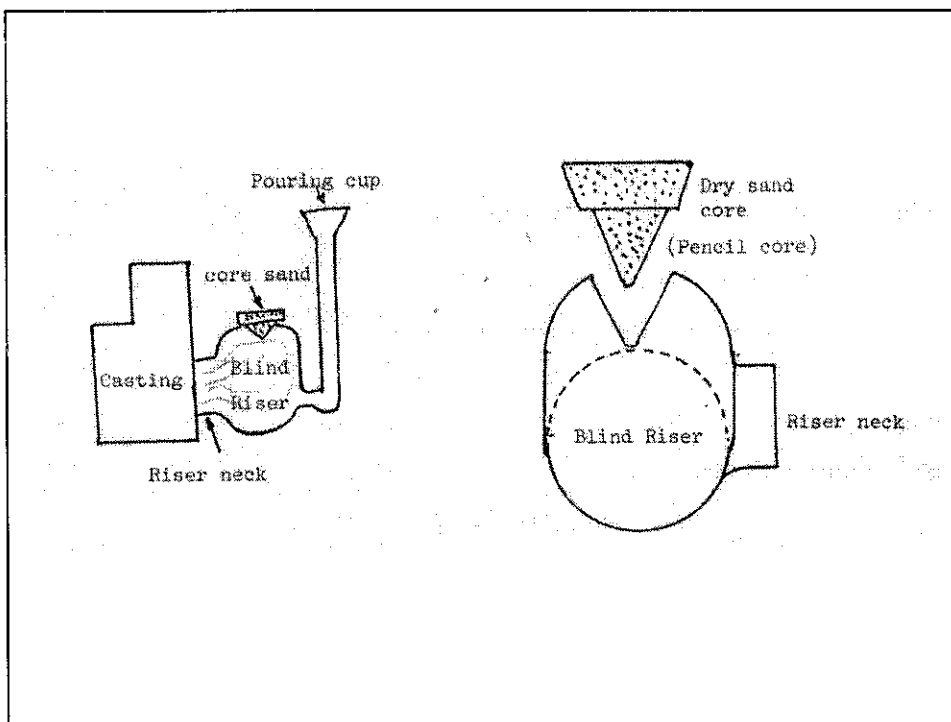


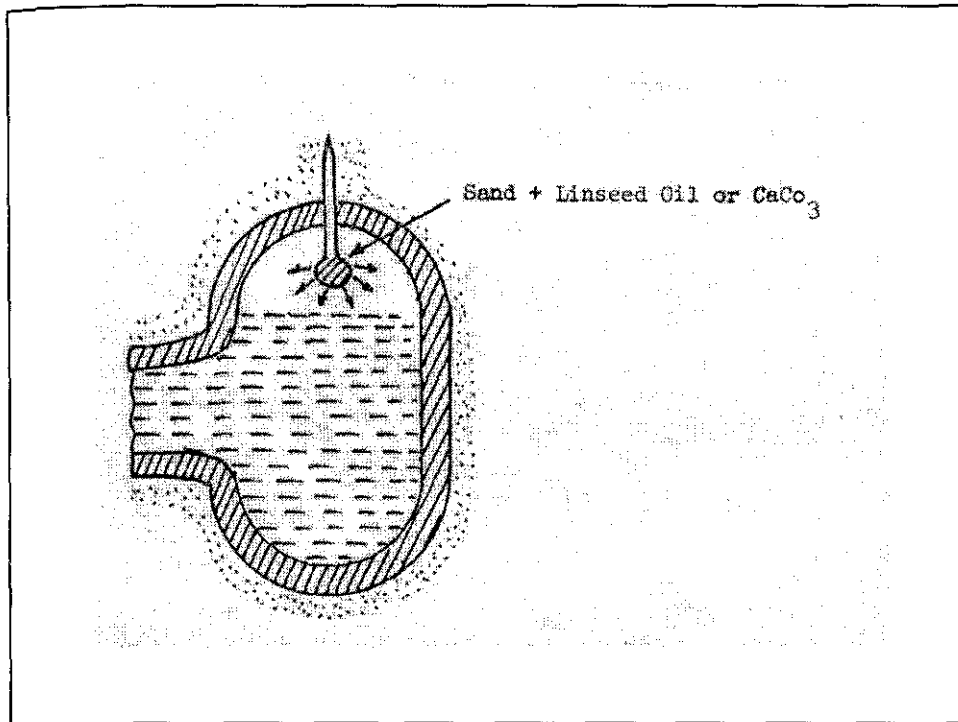


## ประเภทของ Riser

### ■ Blind riser

- เป็น riser แบบปิด เพื่อป้องกันการเกิด Solid file ที่ผิวด้านบน
- มี 2 ลักษณะคือ
  - ใช้ Core Sand ที่มีปลายแหลมอุดลงไปที่ riser ปลายที่แหลมจะทำให้มีอุณหภูมิสูงและโลหะแข็งตัวช้า ไม่เกิดสุญญากาศเพราะ Core Sand มี Permeability
  - Pressure Blind riser คือเมื่อโลหะแข็งตัวเป็นเปลือกหุ้มโลหะหลอมเหลวใช้แท่งทรายผสม linseed หรือ  $\text{CaCO}_3$  แทนลงไป เมื่อสัมผัสอุณหภูมิสูงจะเกิดแก๊สเป็นแรงดันผลักดันโลหะลงไปเติมช่องว่าง





### วิธีการหาขนาด Riser ด้วยวิธี Chvorinov

- Caine ได้ทำการทดลองการหาขนาดของ riser พบว่า

$$x = \frac{a}{y-b} + c$$

- เมื่อ  $x$  คือ freezing ratio เท่ากับ

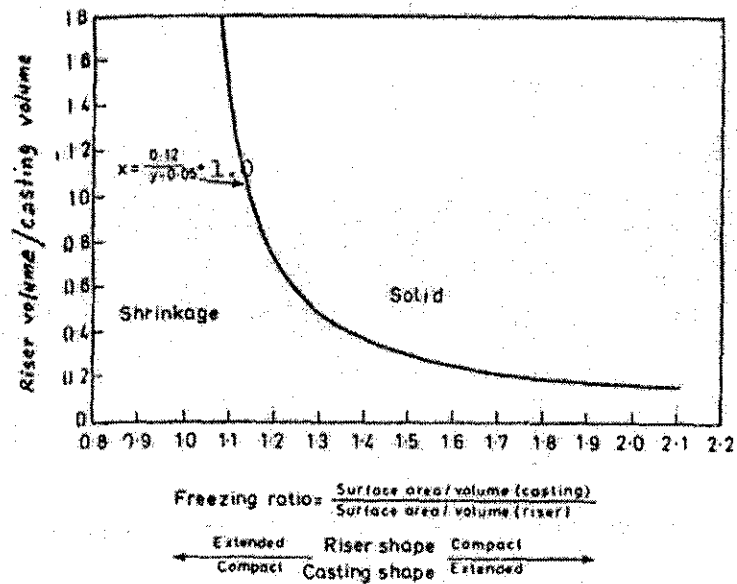
$$\frac{S_c}{V_c} \bigg/ \frac{S_r}{V_r}$$

■  $y$  คือ volume ratio

$$\frac{V_r}{V_c}$$

■  $a, b, c$  คือค่าคงที่ของโลหะ เช่น

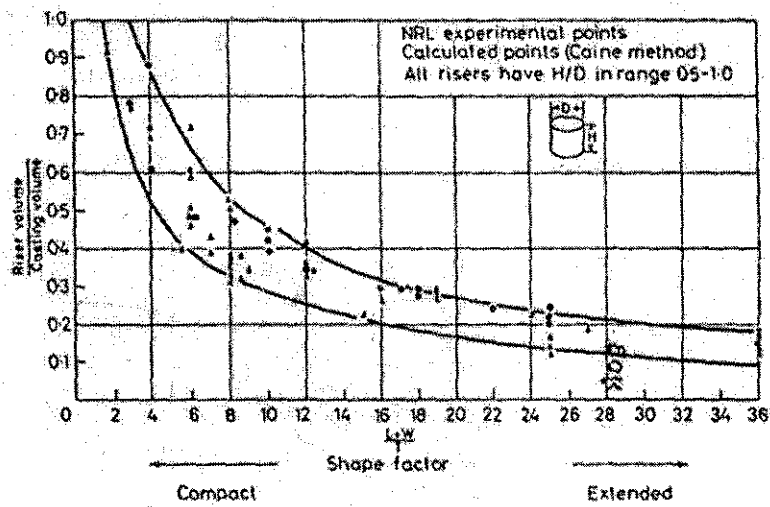
- Cast Steel :  $a = 0.12, b = 0.05, c = 1$
- Brass :  $a = 0.04, b = 0.017, c = 1$



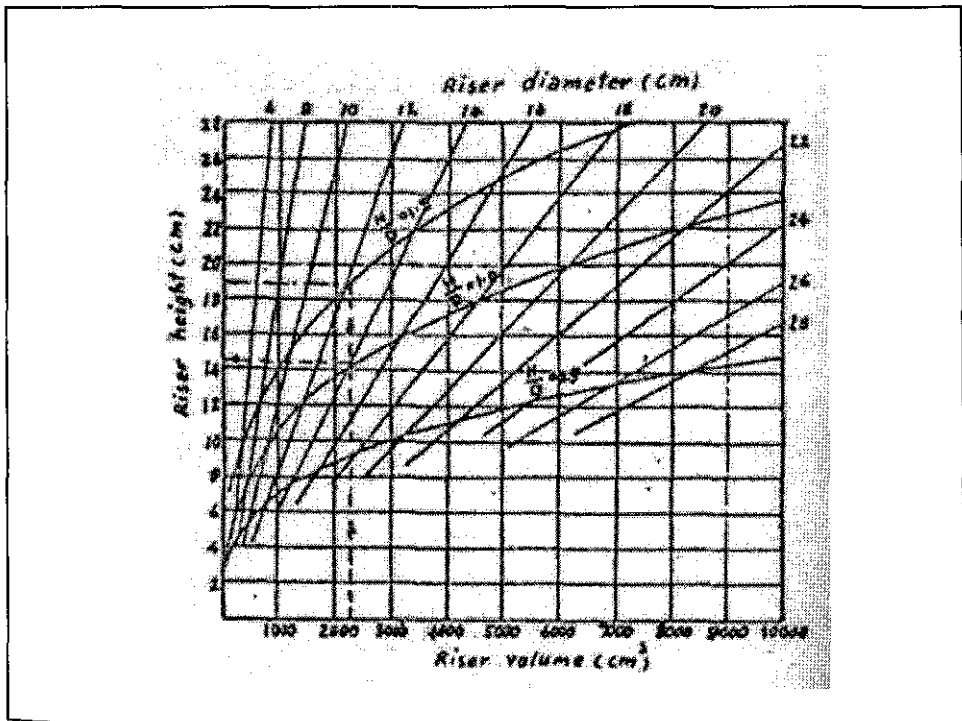
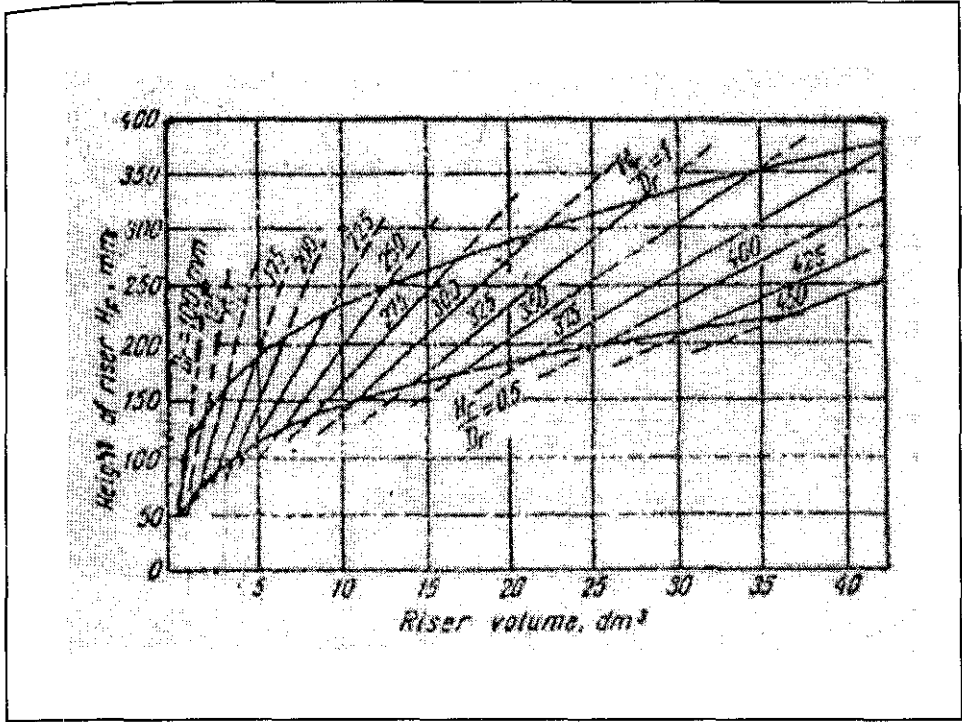
- ต่อมา Naval Research Laboratory ได้พัฒนาต่อจาก Caine ให้เป็นรูปธรรมมากขึ้น โดยแทนที่จะใช้ Volume ratio เปลี่ยนมาใช้ Shape factor แทน

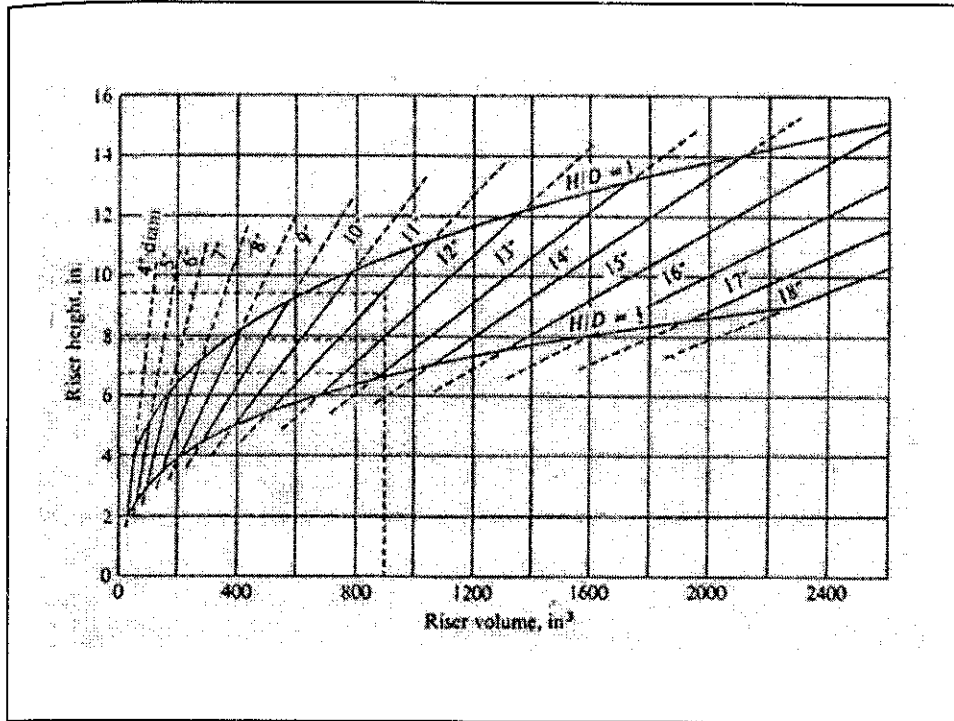
- Shape Factor เท่ากับ

$$\frac{L + W}{T}$$



ภาพที่ 7.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Shape factor กับ Riser Volume/Casting Volume





### ตัวอย่างการหาขนาด Riser

- ต้องการคำนวณหาขนาดของ riser สำหรับงานหล่อที่มีขนาด 500 x 500 x 50 มม

- วิธีทำ

$$\frac{L + W}{T} = \frac{500 + 500}{50} = 20$$

- นำไปหาค่า Volume ratio จากภาพได้

$$\frac{V_r}{V_c} = 0.25$$



$$V_c = 0.5 \times 0.5 \times 0.05 = 0.0125m^3$$

$$= 12.5dm^3$$

$$V_r = V_c \times 0.25$$

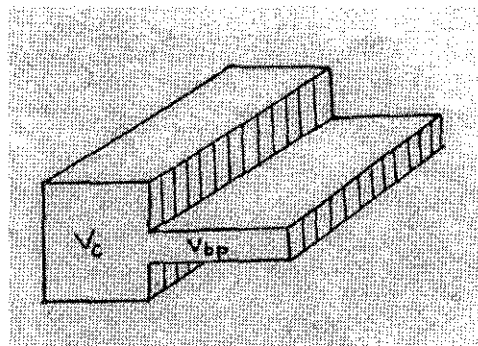
$$= 3.125dm^3$$

นำไปอ่านค่าจากกราฟได้

$$H = 100 \text{ เมื่อ } D = 200 \text{ mm}$$

$$H = 130 \text{ เมื่อ } D = 175 \text{ mm}$$

$$H = 175 \text{ เมื่อ } D = 150 \text{ mm}$$



ในกรณีที่ชิ้นงานหล่อมี Branch Piece การคำนวณขนาด riser จะต่างออกไปดังนี้

$V_c$  = volume of casting

$V_{bp}$  = volume of branch piece

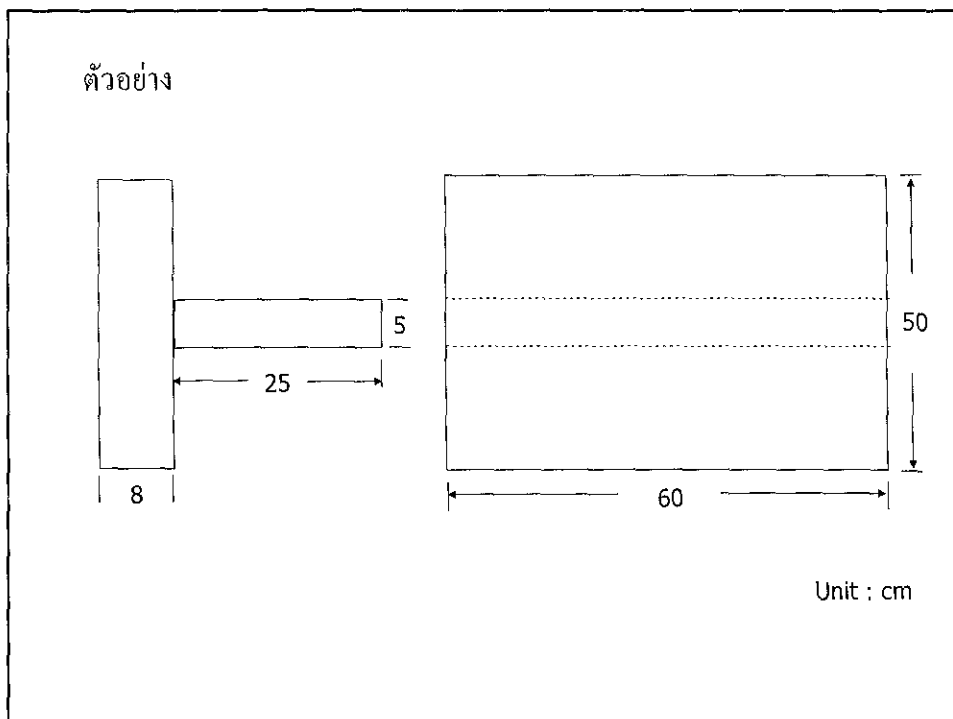
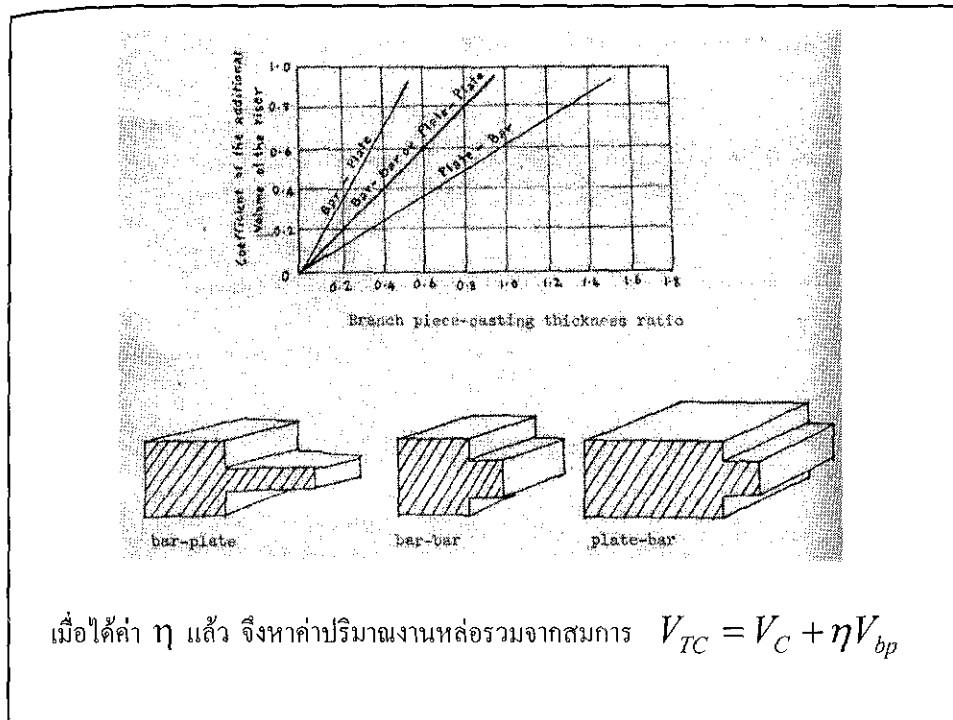
$T_c$  = Thickness of casting

$T_{bp}$  = Thickness of branch piece

วิธีการคำนวณคือหา

อัตราส่วนระหว่าง  $T_{bp} : T_c$

แล้วหาค่า Coefficient of Additional จาก Diagram



$$\text{Shape factor} = \frac{L+W}{T} = \frac{60+50}{8} = 13.8$$

จากแผนภาพ 7.21 ได้

$$\frac{V_r}{V_c} = 0.3$$

$$V_c = 8 \times 50 \times 60 = 24,000 \text{ cm}^3$$

$$V_{bp} = 5 \times 25 \times 60 = 7,500 \text{ cm}^3$$

$$\frac{T_{bp}}{T_c} = \frac{5}{8} = 0.63$$

จากกราฟ 7.24 อ่านค่า  $\eta = 0.63$

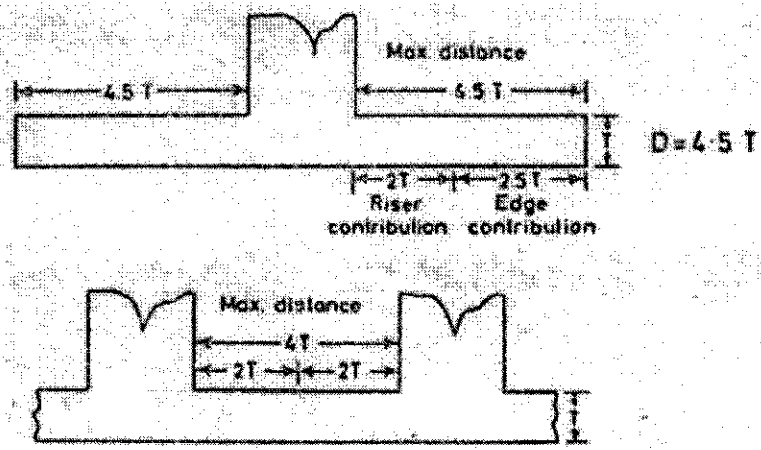
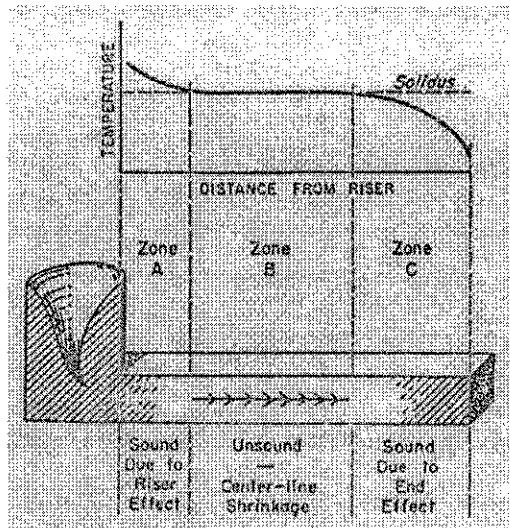
$$\begin{aligned} V_{TC} &= V_c + \eta V_{bp} \\ &= 24,000 + (0.63 \times 7,500) \\ &= 28,730 \text{ cm}^3 \\ \therefore V_r &= 0.3 \times V_{TC} = 8,600 \text{ cm}^3 \end{aligned}$$

จากกราฟ 7.22 หาขนาดของ riser ที่  $H/D = 1$

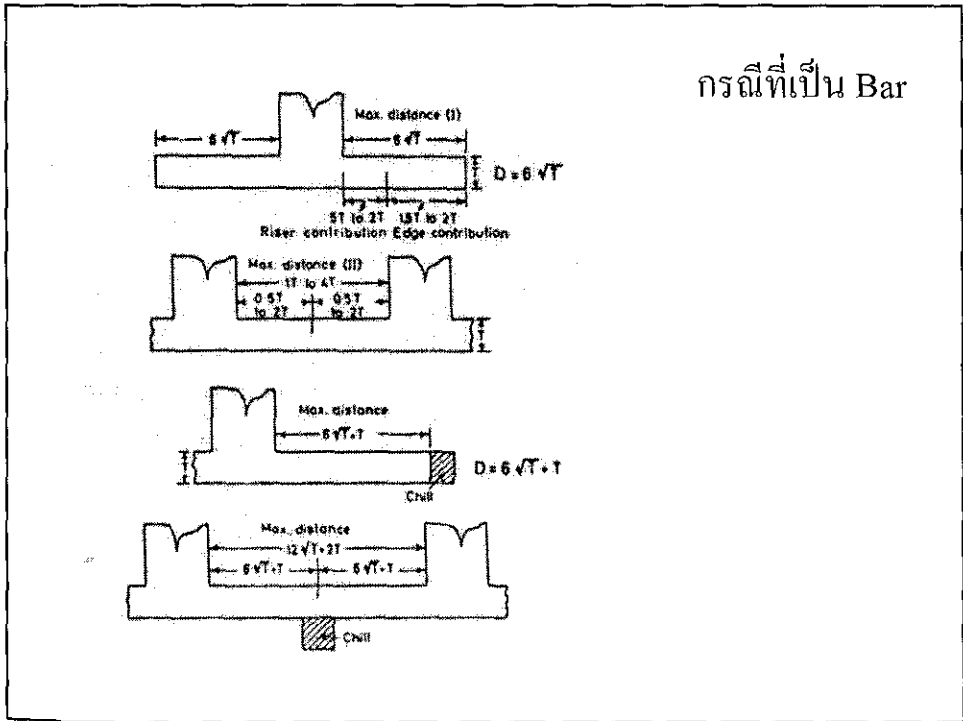
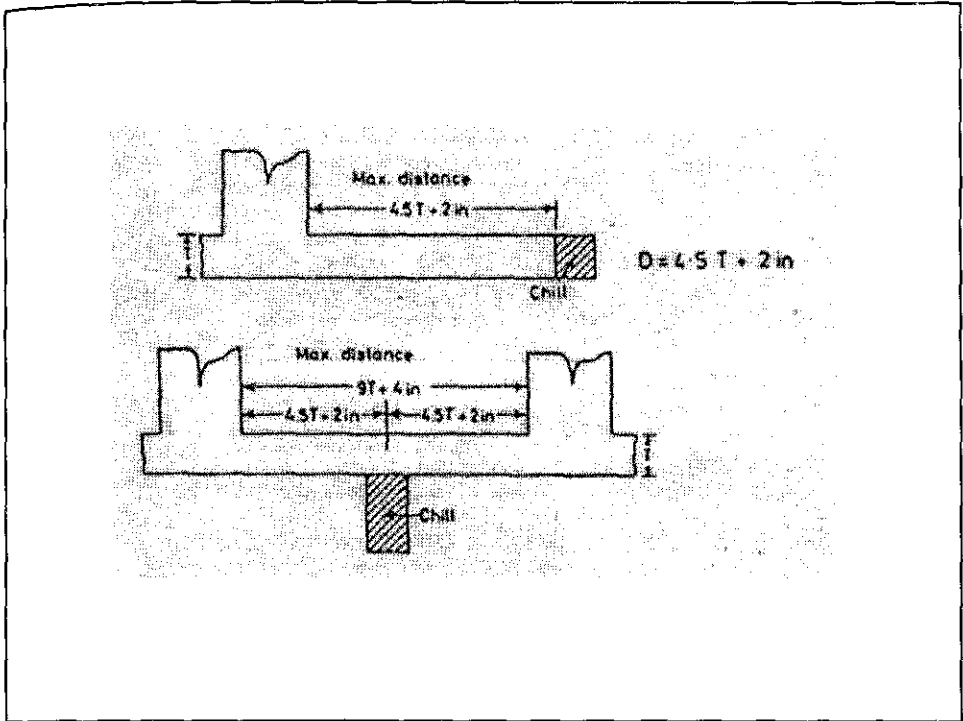
$$H = 22.5 \text{ cm}$$

$$D = 22.5 \text{ cm}$$

ระยะทางที่ riser สามารถแก้ shrinkage ได้



กรณีที่เป็น Plate



### การคำนวณเวลาการแข็งตัวของงานหล่อ

$$\beta = \frac{V / A}{\sqrt{\alpha t}}$$

$$\gamma = \left[ \frac{T_M - T_0}{\rho' H_f} \right] \rho C_p$$

$$\beta = \gamma \left[ \frac{2}{\sqrt{\pi}} + \frac{1}{a\beta} \right]$$

$a = \infty$  for infinite plate

= 4 for infinite cylinder

= 3 for sphere

#### Example

Determine the solidification time of the following iron castings, both poured with no superheat into the molds.

a) A slab casting 100 mm thick

b) A spherically shaped casting 100 mm in diameter

Iron data:  $T_m = 1808$  K;  $H_f = 2.27 \times 10^5$  J kg<sup>-1</sup>;  $\rho' = 7210$  kg m<sup>-3</sup>

Sand data:  $k = 0.865$  W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>;  $\rho = 1600$  kg m<sup>-3</sup>;  $C_p = 1170$  J kg<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>;

sand temperature  $T_0 = 300$  K

$$\gamma = \frac{(1808 - 300)(1600)(1170)}{(7210)(2.72 \times 10^5)} = 1.44$$

$$\alpha = \frac{0.865}{(1600)(1170)} = 4.62 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$$



a) For slab

$$\frac{V}{A} = \frac{\delta}{2} = \frac{0.100}{2} = 0.050m$$

$$\beta = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \gamma = \frac{(2)(1.44)}{\sqrt{\pi}} = 1.62$$

$$\frac{V/A}{\sqrt{\alpha t}} = 1.62$$

$$t = \frac{(V/A)^2}{(1.62)^2 \alpha} = \frac{(0.050)^2}{(1.62^2)(4.62 \times 10^{-7})} = 2060s$$

b) For spherical casting

$$\frac{V}{A} = \frac{D}{6} = \frac{0.100}{6} = 0.0167m$$

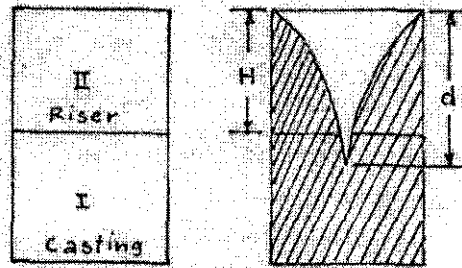
$$\beta = \gamma \left[ \frac{2}{\sqrt{\pi}} + \frac{1}{3\beta} \right]$$
$$= 1.88$$

$$\frac{V/A}{\sqrt{\alpha t}} = 1.88$$

$$t = \frac{(V/A)^2}{(1.88)^2 \alpha} = \frac{(0.0167)^2}{(1.88^2)(4.62 \times 10^{-7})} = 171s$$

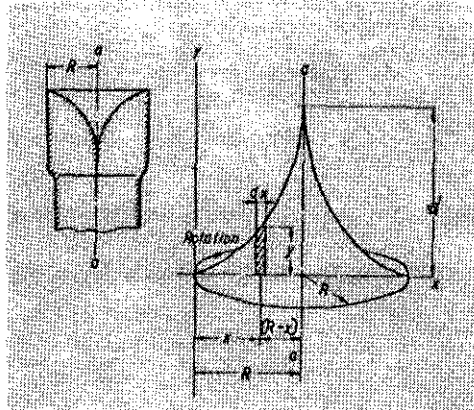
## บทที่ 8 การคำนวณขนาดของโรเซอร์ โดยวิธีของ Wlodawer

- จากหลักการของ Chvorinov ที่ว่า Modulus การ  
แข็งตัวของโรเซอร์จะต้องมีค่ามากกว่า Modulus การแข็งตัว  
ของชิ้นงานหล่อ ( $M_R > M_C$ ) เพื่อให้โรเซอร์แข็งตัวช้ากว่า  
งานหล่อ
- $M_R$  ควรจะมีค่ามากกว่า  $M_C$  อยู่ประมาณ 1.2 - 1.4 เท่า  
จึงจะปลอดภัยจากการหดตัวของโลหะที่ลงไปชิ้นงานหล่อ



เมื่อเกิดการแข็งตัวจะเกิดรอยบวมขึ้นทำให้ Riser มีพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นและทำให้  $M_R$  ลดลง ทำให้การแข็งตัวที่ Riser เร็วกว่างานหล่อ และรอยบวมจะกินลึกลงไปในงานหล่อทำให้ชิ้นงานเสีย

- ดังนั้นจึงต้องมีการเพิ่มค่า  $M_R$  ให้มากกว่า  $M_C$  อยู่ประมาณ 1.2 - 1.4 เท่า
- หรือ  $d < 0.8 H$
- หรือปริมาตรของแอ่งรอยบวมต้องมีค่าไม่เกิน 14% ของปริมาตรของ Riser ซึ่งค่านี้จะขึ้นอยู่กับรูปร่างของ Riser ด้วย

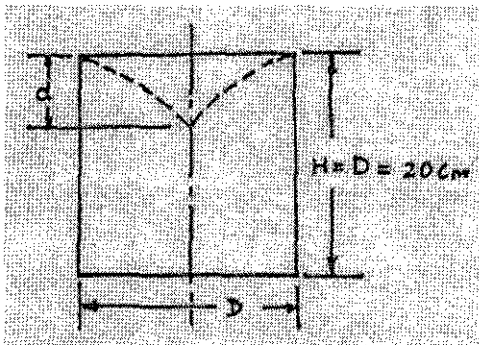


$$d = \frac{R^2}{2P}$$

ปริมาตรของกรวย  $V_{SC} = \frac{\pi R^4}{12P}$

พื้นที่ผิวของกรวย  $H = \frac{2\pi}{3P} \left[ (R^2 + P^2)^{3/2} - P^3 \right]$

ตัวอย่างที่ 1



Riser มีรูปร่างเป็นทรงกระบอก

$$H = D = 20 \text{ cm}$$

$$V_R = \frac{\pi}{4} D^2 H = 6283 \text{ cm}^3$$

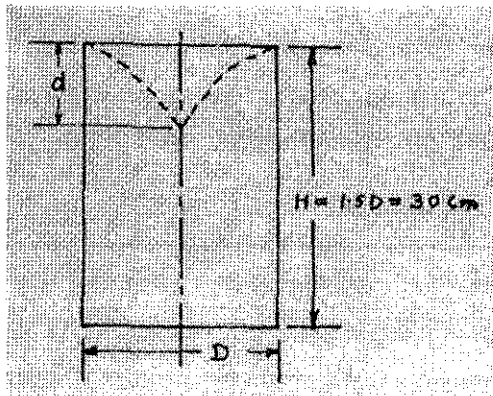
$$S_R = \pi D H + \frac{\pi}{4} D^2 = 1571 \text{ cm}^2$$

$$M_R = \frac{V_R}{S_R} = \frac{6283}{1571}$$

$$\approx 4 \text{ cm}$$

ความลึก d ซม.	8	12	16	20
ค่าพารามิเตอร์ P ( $P = R^2/2d$ )	6.25	4.17	3.12	2.5
ค่าปริมาตรกรวย $V_{sc}$ ซม. <sup>3</sup> ( $V_{sc} = \pi R^4/12P$ )	419	628	838	1047
พื้นที่ผิวของกรวย และหม H ซม. <sup>2</sup>	370	425	488	555
ปริมาตรของโลหะหลังจาก การแข็งตัว $V_E$ ซม. <sup>3</sup>	5864	5655	5445	5235
พื้นที่ผิวหลังจากกลั่นตัว แข็งตัว (A + H)	1627	1681	1744	1812
ค่าสัมประสิทธิ์การเย็นตัวหลังจากกลั่นตัว แข็งตัว $M_E = \frac{VE}{(A+H)}$ ซม.	3.60	3.36	3.12	2.89

## ตัวอย่างที่ 2



Riser มีรูปร่างเป็นทรงกระบอก

$$H = 1.5D = 30 \text{ cm}$$

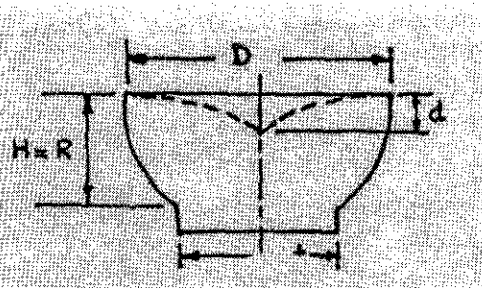
$$V_R = \frac{\pi}{4} D^2 H = 9425 \text{ cm}^3$$

$$S_R = \pi D H + \frac{\pi}{4} D^2 = 2199 \text{ cm}^2$$

$$M_R = \frac{V_R}{S_R} = \frac{9425}{2199} = 4.286 \text{ cm}$$

ค่าความลึก d ซม.	8	12	16	20	25	30
ค่าพหุนามเพื่อ P	6.25	4.16	3.13	2.5	2	1.67
ปริมาตรกรวยแหลม $V_{sc}$ ซม. <sup>3</sup>	419	628	838	1047	1309	1571
พื้นที่ผิวของกรวยแหลม H ซม. <sup>2</sup>	370	425	488	555	645	736
ปริมาตรของโลหะในไรเซอร์	9006	8706	8507	8378	8116	7854
ผลสัมฤทธิ์เชิงตัว $V_E$ ซม. <sup>3</sup>						
พื้นที่ผิวไรเซอร์หลังการถลุง	2255	2310	2372	2440	2530	2629
เชิงตัว (A + H)						
โมดูลัสการแข็งตัวหลังการ	3.98	3.81	3.62	3.43	3.21	2.96
สัมประสิทธิ์เชิงตัว						
$M_E = \frac{V_E}{(A+H)}$ ซม.						
ความลึก d เมื่อเทียบกับ H	0.266	0.4	0.538	0.67	0.83	1.0
ปริมาตร $V_{sc}$ เมื่อเทียบกับ $V_R$	0.044	0.067	0.090	0.111	0.139	0.17
ปริมาตร $V_E$ เมื่อเทียบกับ $V_R$	0.955	0.933	0.911	0.888	0.861	0.833
ค่าโมดูลัส $M_E$ เมื่อเทียบกับ $M_R$	0.93	0.88	0.84	0.80	0.748	0.696

ตัวอย่างที่ 3



Riser มีรูปร่างเป็นครึ่งทรงกลม

$$H = R = 14.2 \text{ cm}$$

$$V_R = \frac{1}{2} \times \frac{4}{3} \pi R^3 = 5997 \text{ cm}^3$$

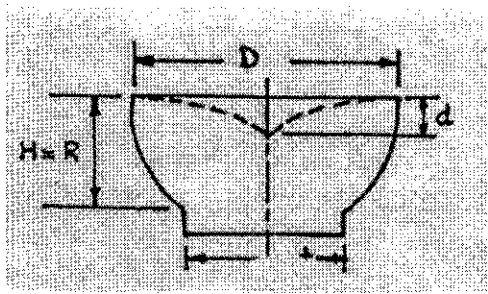
$$S_R = \frac{1}{2} \times 4\pi R^2 + \pi R^2 = 1900 \text{ cm}^2$$

$$M_R = \frac{V_R}{S_R} = \frac{5997}{1900} = 3.14 \text{ cm}$$



ค่าความลึก d ซม.	8	12	16	20	25	30
ค่าพารามิเตอร์ P	6.25	4.16	3.18	2.5	2	1.67
ปริมาตรกรวยแหลม $V_{sc}$ ซม <sup>3</sup>	419	628	838	1047	1309	1571
พื้นที่ผิวของกรวยแหลม H ซม <sup>2</sup>	370	428	488	555	645	738
ปริมาตรของโลหะในไรเซอร์ หลังจากการแข็งตัว $V_E$ ซม <sup>3</sup>	9006	8796	8987	8378	8116	7854
พื้นที่ผิวไรเซอร์ซึ่งทำการ แข็งตัว (A + H)	2255	2310	2372	2440	2530	2628
โมดูลัสการแข็งตัวซึ่งจาก สัมประสิทธิ์แข็งตัว $M_E = \frac{V_E}{(A+H)}$ ซม	3.98	3.81	3.62	3.43	3.21	2.99
ความลึก d เมื่อเทียบกับ H	0.266	0.4	0.593	0.67	0.83	1.0
ปริมาตร $V_{sc}$ เมื่อเทียบกับ $V_R$	0.044	0.087	0.090	0.111	0.139	0.17
ปริมาตร $V_E$ เมื่อเทียบกับ $V_R$	0.955	0.933	0.911	0.888	0.861	0.833
ค่าโมดูลัส $M_E$ เมื่อเทียบกับ $M_R$	0.93	0.88	0.84	0.80	0.748	0.596

ตัวอย่างที่ 3



Riser มีรูปร่างเป็นครึ่งทรงกลม

$$H = R = 14.2 \text{ cm}$$

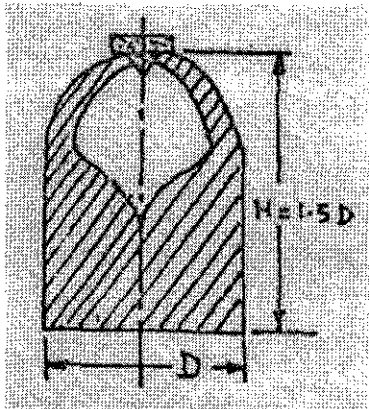
$$V_R = \frac{1}{2} \times \frac{4}{3} \pi R^3 = 5997 \text{ cm}^3$$

$$S_R = \frac{1}{2} \times 4\pi R^2 + \pi R^2 = 1900 \text{ cm}^2$$

$$M_R = \frac{V_R}{S_R} = \frac{5997}{1900} = 3.14 \text{ cm}$$

ค่าความลึก d ซม.	5	7.5	10	14.2
ค่าพารามิเตอร์ P	20,164	13,443	10,082	7.1
ปริมาตร $V_{sc} = \frac{\pi R^4}{12p}$ ซม. <sup>3</sup>	528	702	1056	1499
พื้นที่ผิวของทรงกลม H ซม. <sup>2</sup>	659	687	720	799
ปริมาตรของโหนดในโรเฟอริงสังกะสี การขึ้นตัว $V_E$ ซม. <sup>3</sup>	5469	5206	4941	4498
พื้นที่ผิวของโรเฟอริงสังกะสี การขึ้นตัว A + H ซม. <sup>2</sup>	1025	1954	1991	2067
โมดูลัสการขึ้นตัวสังกะสี การขึ้นตัว $M_E = \frac{V_E}{A+H}$ ซม.	2.84	2.66	2.48	2.18
ความลึก d เมื่อเทียบกับ H	0.352	0.528	0.704	1.0
ปริมาตร $V_{sc}$ เมื่อเทียบกับ $V_R$	0.088	0.132	0.176	0.25
ปริมาตร $V_E$ เมื่อเทียบกับ $V_R$	0.912	0.868	0.824	0.75
ค่าโมดูลัส $M_E$ เมื่อเทียบกับ $M_R$	0.904	0.847	0.790	0.69

ตัวอย่างที่ 4



Blind Riser มีรูปร่างเป็นทรงกระบอก  
ด้านบนเป็นครึ่งทรงกลม

$$H = 1.5D$$

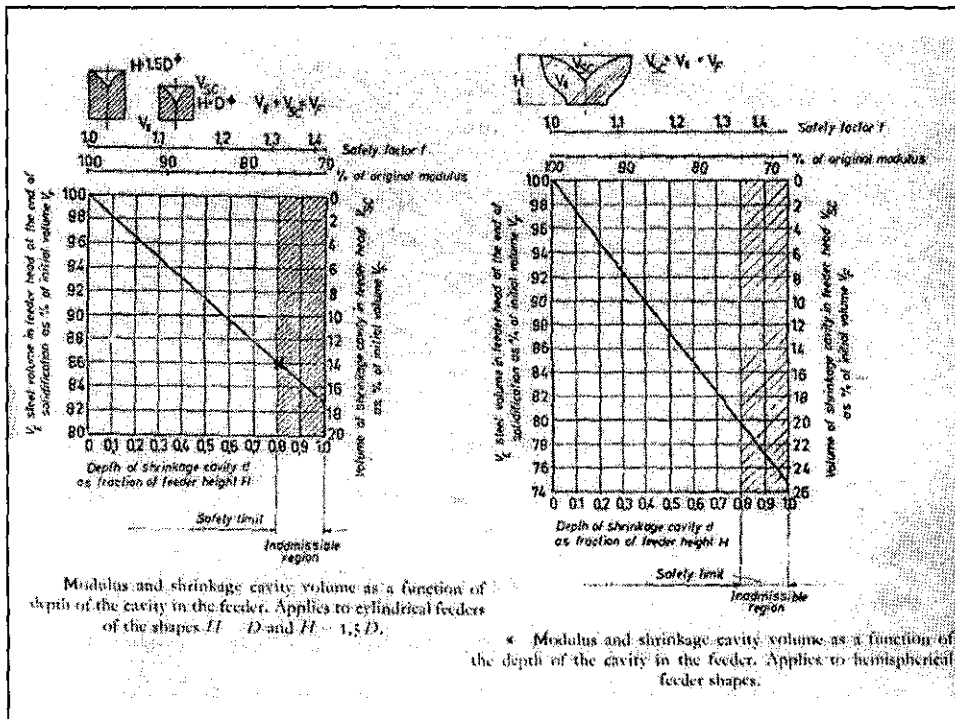
$$D = 20 \text{ cm}$$

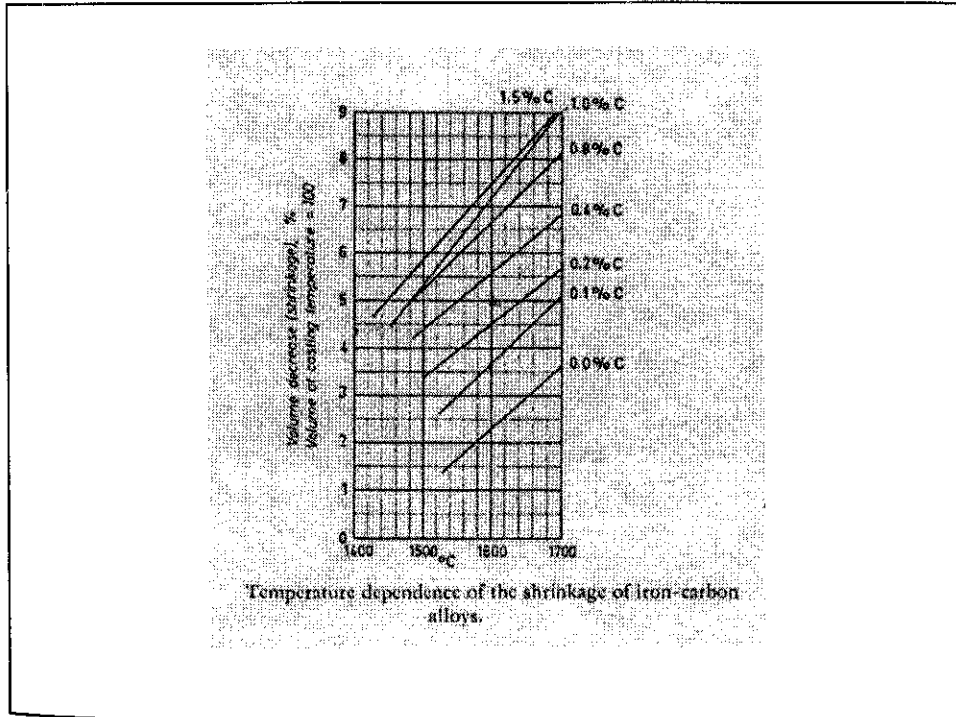
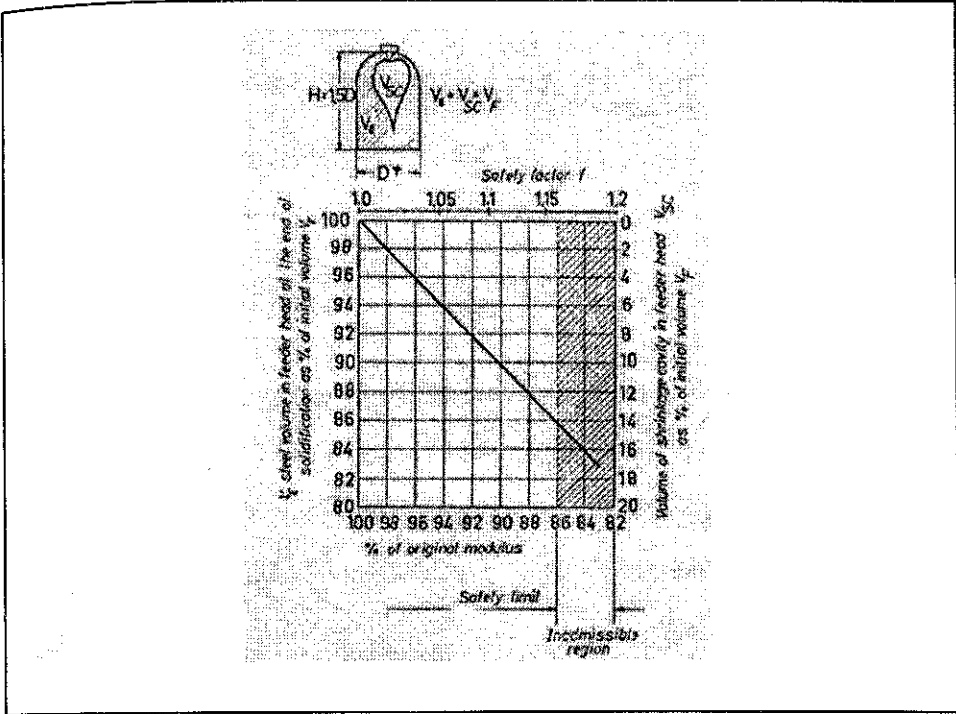
$$V_R = \frac{\pi}{4} D^2 H + \frac{1}{2} \times \frac{4}{3} \pi \left(\frac{D}{2}\right)^3 = 11519 \text{ cm}^3$$

$$S_R = \pi D H + \frac{1}{2} \times 4\pi \left(\frac{D}{2}\right)^2 = 2513 \text{ cm}^2$$

$$M_R = \frac{V_R}{S_R} = \frac{11519}{2513} = 4.58 \text{ cm}$$

ค่า $V_{sc}$ เทียบกับ $V_R$	0.02	0.05	0.1	0.13	0.17
ค่า $V_E$ เทียบกับ $V_R$	0.98	0.95	0.90	0.87	0.83
ค่า $M_E$ เทียบกับ $M_R$	0.98	0.95	0.90	0.87	0.83
ค่าพหุคูณ $F = \frac{MR}{ME}$	1.04	1.05	1.11	1.15	1.2





Change in shrinkage at 1600 °C, after Benedicks, Ericsson et al	
ธาตุผสม (Alloying element)	อัตราการขยายตัวหรือหดตัวต่อ 1% ของธาตุผสม
นิกเกิล	- 0.53
นิกเกิล	- 0.0354
แมงกานีส	+ 0.0585
โครเมียม	+ 0.12
ซิลิกอน	+ 1.03
อลูมิเนียม	+ 1.70

ตัวอย่าง

จงคำนวณหาค่า Specific Shrinkage ของเหล็กคาร์บอนที่มีส่วนผสม  
C 1.0%, Mn 12%, Si 0.3%, Cr 2% ที่ 1500 °C  
จากภาพ ที่ 1.0%C 1500 °C ค่า Shrinkage = 5.3%

$$\text{Mn 12\%} = 0.0585 \times 12 = 0.702\%$$

$$\text{Si 0.3\%} = 1.03 \times 0.30 = 0.309\%$$

$$\text{Cr 0.2\%} = 0.12 \times 2.00 = 0.240\%$$

$$\text{รวม} \quad \underline{6.251\%}$$

Change in shrinkage at 1600 °C, after Benedicks, Ericsson et al

ธาตุผสม (Alloying element)	อัตราการขยายตัวหรือหดตัวต่อ 1% ของธาตุผสม
สังกะสี	- 0.53
นิกเกิล	- 0.0354
แมงกานีส	+ 0.0585
โครเมียม	+ 0.12
ซิลิกอน	+ 1.03
อลูมิเนียม	+ 1.70

ตัวอย่าง

จงคำนวณหาค่า Specific Shrinkage ของเหล็กคาร์บอนฟิลที่มีส่วนผสม C 1.0%, Mn 12%, Si 0.3%, Cr 2% ที่ 1500 °C

จากภาพ ที่ 1.0% C 1500 °C ค่า Shrinkage = 5.3%

$$\text{Mn } 12\% = 0.0585 \times 12 = 0.702\%$$

$$\text{Si } 0.3\% = 1.03 \times 0.30 = 0.309\%$$

$$\text{Cr } 0.2\% = 0.12 \times 2.00 = 0.240\%$$

$$\text{รวม } \underline{6.251\%}$$



ปริมาณน้ำโลหะที่สูงสุดที่ Riser สามารถส่งไปชดเชยการหดตัวของ  
ชิ้นงานหล่อ ( $V_{max}$ ) ขึ้นอยู่กับ Specific Shrinkage (%S)

$$V_{max} = V_R \times \frac{14 - S}{S} \quad \text{ทรงกระบอกและ โคมแบบปิด}$$

$$V_{max} = V_R \times \frac{20 - S}{S} \quad \text{ครึ่งทรงกลม}$$

นอกจากการใช้สูตรคำนวณหา  $V_{max}$  แล้ว สามารถใช้ตารางคำนวณได้ ดังตารางที่  
8.6 - 8.15 ในเอกสารหน้า 141 - 151

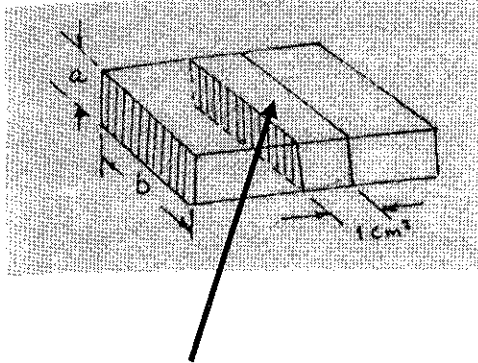
ตัวอย่าง ชิ้นงานหล่อมี  $M_C = 0.5$  cm ปริมาตร  $100$  cm<sup>3</sup> อัตราการหดตัว 5%  
จงคำนวณหาขนาดไรเซอร์

$$\text{จาก } M_R = 1.2M_C = 1.2(0.5) = 0.6 \text{ cm}$$

จากตาราง 8.6 สำหรับ riser ทรงกระบอก  $H = D$  เมื่อค่า  $M_R = 0.6$  cm  
และ %S = 5% อ่านค่าได้  $H = D = 36$  cm,  $V_{max} = 67$  cm<sup>3</sup> ซึ่งน้อยกว่า  
 $V_C$  ดังนั้นจึงต้องเพิ่มขนาด riser

$M_R = 0.7$  จะได้ขนาด Riser  $H = D = 42$  cm,  $V_{max} = 104$  cm<sup>3</sup> ซึ่ง  
มีค่ามากกว่า  $V_C$  ดังนั้นจึงสามารถใช้ได้

### ชิ้นงานที่มีลักษณะเป็นแท่ง (Bar)



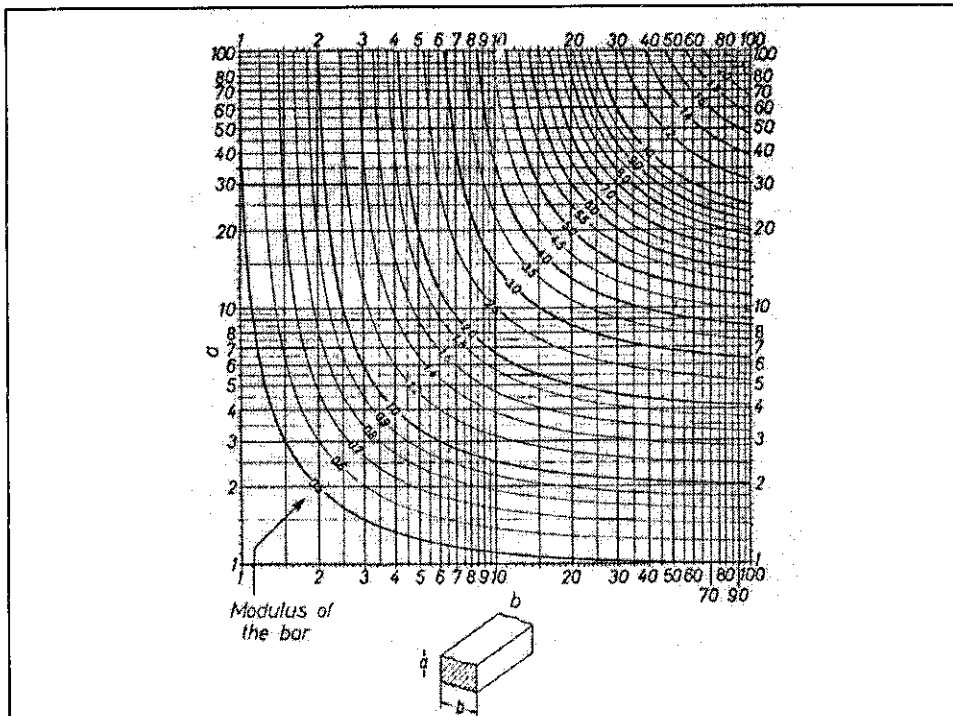
Basic Area

$$V = a \times b \times 1$$

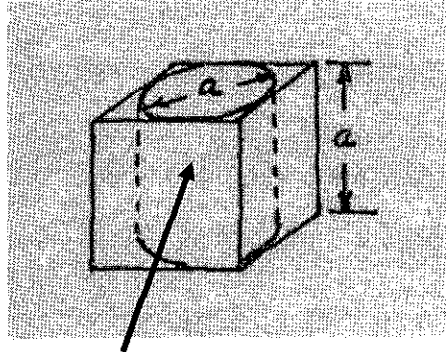
$$A = 2(a + b) \times 1$$

$$M = \frac{V}{A} = \frac{a \times b \times 1}{2(a + b) \times 1}$$

$$= \frac{a \times b}{2(a + b)}$$



ชิ้นงานที่มีลักษณะเป็นลูกบาศก์ (Cubic)



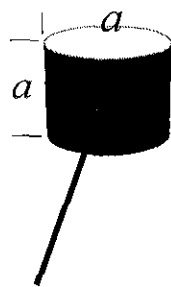
Basic Area

$$V = a^3$$

$$A = 6a^2$$

$$M = \frac{V}{A} = \frac{a^3}{6a^2} = \frac{a}{6}$$

ชิ้นงานทรงกระบอกส่วนสูงเท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลาง



Basic Area

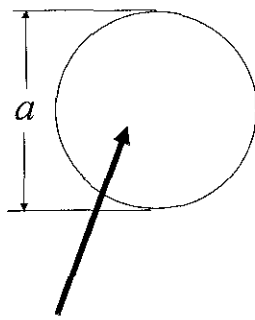
$$V = \frac{\pi}{4} a^2 \cdot a = \frac{\pi}{4} a^3$$

$$A = 2 \frac{\pi}{4} a^2 + \pi a^2 = \frac{3}{2} \pi a^2$$

$$M = \frac{V}{A} = \frac{\frac{\pi}{4} a^3}{\frac{3}{2} \pi a^2}$$

$$= \frac{a}{6}$$

### ชิ้นงานที่มีลักษณะเป็นทรงกลม (Sphere)



Basic Area

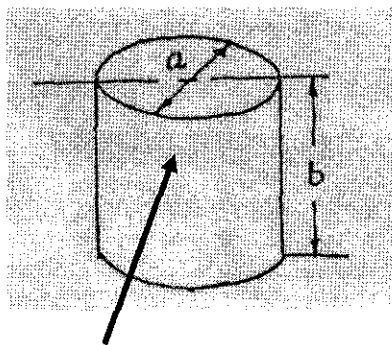
$$V = \frac{\pi}{6} a^3$$

$$A = \pi a^2$$

$$M = \frac{V}{A} = \frac{\frac{\pi}{6} a^3}{\pi a^2}$$

$$= \frac{a}{6}$$

### ชิ้นงานที่มีลักษณะเป็นทรงกระบอก (Cylinder)



Basic Area

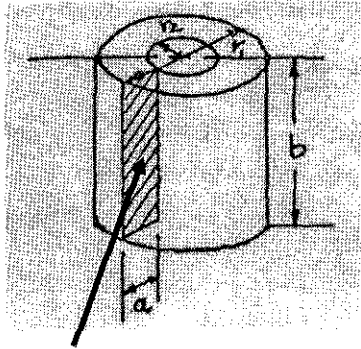
$$V = \frac{\pi}{4} a^2 \times b$$

$$A = \frac{\pi}{2} a^2 + a \times b$$

$$M = \frac{V}{A} = \frac{\frac{\pi}{4} a^2 \times b}{\frac{\pi}{2} a^2 + a \times b}$$

$$= \frac{a \times b}{2(a + 2b)} = \frac{r \times b}{2(r + b)}$$

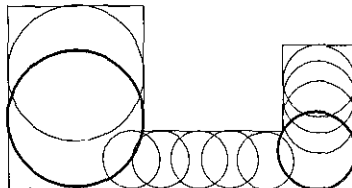
## ชิ้นงานทรงกระบอกกลวง (Hollow Cylinder)



Basic Area

$$\begin{aligned}
 V &= (\pi r_1^2 - \pi r_2^2) b \\
 &= \pi (r_1 - r_2)(r_1 + r_2) \times b \\
 A &= 2(\pi r_1^2 - \pi r_2^2) + 2\pi r_1 \times b + 2\pi r_2 \times b \\
 &= 2\pi (r_1 + r_2)[(r_1 - r_2) + b] \\
 M &= \frac{V}{A} = \frac{\pi (r_1 - r_2)(r_1 + r_2) \times b}{2\pi (r_1 + r_2)[(r_1 - r_2) + b]} \\
 &= \frac{a \times b}{2(a + b)}
 \end{aligned}$$

จากตัวอย่างจะเห็นว่าค่า M ของ Cubic, Cylindrical และ Sphere ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง a จะมีโมดูลัสการยื่นตัวเท่ากันคือ  $a/6$  ซึ่งหมายถึงว่าทั้งสามแบบจะใช้เวลาในการแข็งตัวเท่ากันด้วย จึงเป็นที่มาของการใช้การวาดวงกลมสัมผัสผัดขอบของชิ้นงานเพื่อหาจุดว่าตำแหน่งใดจะเกิดการยื่นตัวก่อนหลัง



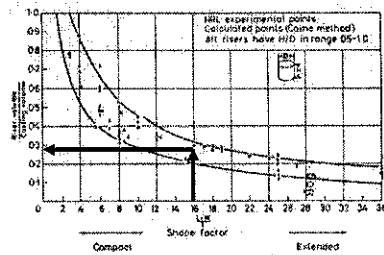
ตัวอย่าง

กำหนดให้ชิ้นงานหล่อมีขนาด 40 x 40 x 5 cm

คำนวณขนาดโรเซอร์ด้วยวิธี NRL

$$\frac{L+W}{T} = \frac{40+40}{5} = 16$$

จากแผนภาพ 7.21 ได้

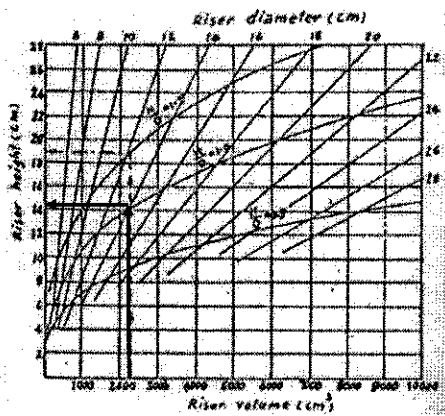


ภาพที่ 7.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Shape factor กับ Riser Volume/Casting Volume

$$\frac{V_R}{V_C} = 0.28$$

$$V_C = 40 \times 40 \times 5 = 8000 \text{ cm}^3$$

$$V_R = 0.28 V_C = 2240 \text{ cm}^3$$



ถ้าให้ขนาดของโรเซอร์เป็นรูป

ทรงกระบอก  $H = D$

จากแผนภาพ 7.22

$$H = 14.2 \text{ cm}$$

$$D = 14.2 \text{ cm}$$

หาขนาดของโรเตอร์ด้วยวิธี Wlodawer

$$M_C = \frac{V}{S}$$

$$= \frac{40 \times 40 \times 5}{(40 \times 40 \times 2) + (5 \times 40 \times 4)}$$

$$= 2.0 \text{ cm}$$

$$M_R = 1.2 M_C = 2.4 \text{ cm}$$

จากตารางที่ 8.6 สำหรับโรเตอร์ที่มีขนาด  $H = D$  และมีค่า  $M_R = 2.4 \text{ cm}$

$$H = 14.4 \text{ cm}$$

$$D = 14.4 \text{ cm}$$

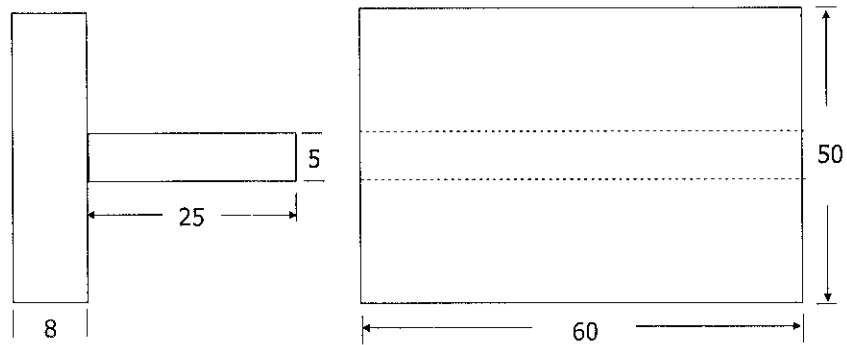
แต่จากการตรวจสอบ  $V_{\max}$  พบว่าที่ 4%  $V_{\max} = 5800 \text{ cm}^3$

$$5\% V_{\max} = 4100 \text{ cm}^3$$

$$6\% V_{\max} = 3100 \text{ cm}^3$$

ซึ่งมีค่าน้อยกว่า  $8000 \text{ cm}^3$  จึงต้องเพิ่ม  $H$  เป็น  $16.8 \text{ cm}$  ได้  $V_{\max} = 9300 \text{ cm}^3$

ตัวอย่าง



Unit : cm



คำนวณหาขนาด Riser ด้วยวิธี NRL

$$\text{Shape factor} = \frac{L+W}{T} = \frac{60+50}{8} = 13.8$$

จากแผนภาพ 7.21 ได้

$$\frac{V_r}{V_c} = 0.3$$

$$V_c = 8 \times 50 \times 60 = 24,000 \text{ cm}^3$$

$$V_{bp} = 5 \times 25 \times 60 = 7,500 \text{ cm}^3$$

$$\frac{T_{bp}}{T_c} = \frac{5}{8} = 0.63$$

จากกราฟ 7.24 อ่านค่า  $\eta = 0.63$

$$\begin{aligned} V_{TC} &= V_c + \eta V_{bp} \\ &= 24,000 + (0.63 \times 7,500) \\ &= 28,730 \text{ cm}^3 \\ \therefore V_r &= 0.3 \times V_{TC} = 8,600 \text{ cm}^3 \end{aligned}$$

จากกราฟ 7.22 หาขนาดของ riser ที่  $H/D = 1$

$$H = 22.5 \text{ cm}$$

$$D = 22.5 \text{ cm}$$

หาขนาดของโรเซอร์ด้วยวิธี Wlodawer

$$M_C = \frac{V}{S}$$

$$= \frac{(8 \times 50 \times 60) + (5 \times 25 \times 60)}{(50 \times 60 \times 2) + (8 \times 50 \times 2) + (8 \times 60 \times 2) + (25 \times 60 \times 2) + (5 \times 25 \times 2)}$$

$$= \frac{31500}{11010} = 2.86 \text{ cm}$$

$$M_R = 1.2 M_C = 3.44 \text{ cm}$$

จากตารางที่ 8.6 สำหรับโรเซอร์ที่มีขนาด  $H = D$  และมีค่า  $M_R = 3.44 \text{ cm}$

$$H = 21.6 \text{ cm}$$

$$D = 21.6 \text{ cm}$$

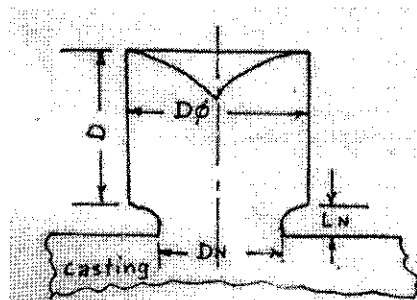
แต่จากการตรวจสอบ  $V_{\max}$  พบว่าที่ 4%  $V_{\max} = 20000 \text{ cm}^3$

$$5\% V_{\max} = 14000 \text{ cm}^3$$

$$6\% V_{\max} = 11000 \text{ cm}^3$$

ซึ่งมีค่าน้อยกว่า  $31500 \text{ cm}^3$  จึงต้องเพิ่ม  $H$  เป็น  $25.6 \text{ cm}$  ได้  $V_{\max}$  ที่ 4% =  $33000 \text{ cm}^3$

ส่วนต่อระหว่างโรเซอร์กับชิ้นงานหล่อ



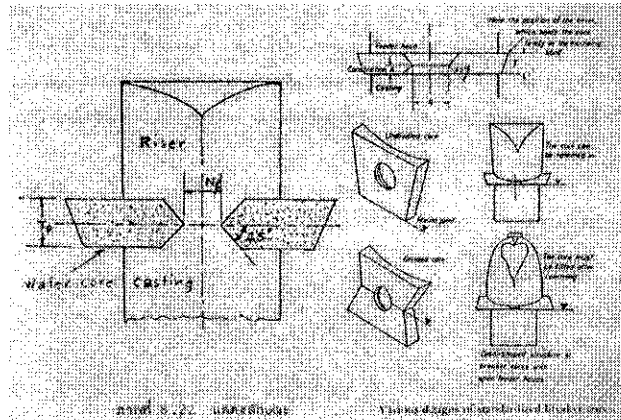
ภาพที่ 8.21

ส่วนต่อของโรเซอร์ที่มีขนาดใหญ่จะทำให้เสียค่าใช้จ่ายและเวลาในการตัดมาก ส่วนต่อของโรเซอร์ขนาดเล็กอาจทำให้ส่วนต่อเกิดการแข็งตัวก่อน

$$M_C : M_N : M_R = 1 : 1.1 : 1.2$$

$$D_N = L_N + 0.2 D_\phi$$

การใช้ Wafer หรือ Washburn core จะทำให้มุมแหลมของ Core Sand มีอุณหภูมิสูงและทำให้เกิดการแข็งตัวช้า



$$T_{\phi} = 0.093D \approx 0.56M_C$$

$$N_{\phi} = 0.39D \approx 2.34M_C$$

ตัวอย่าง

งานหล่อมี  $M_C = 1.67$  จงหาขนาดของ wafer core

$$T_{\phi} = 0.56M_C = 0.93cm$$

$$N_{\phi} = 2.34M_C = 3.9cm$$

ถ้าจะหาจากสูตร

$$T_{\phi} = 0.093D$$

$$N_{\phi} = 0.39D$$

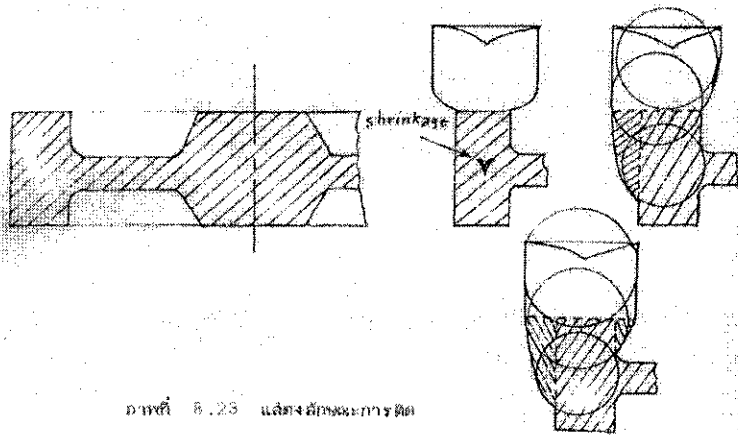
$$M_R = 1.2M_C = 1.2 \times 1.67 = 2cm$$

$$H = D = 12cm$$

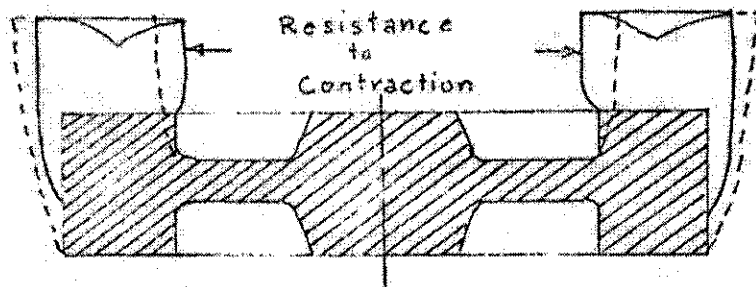
$$T_{\phi} = 0.093 \times 12 = 1.1cm$$

$$N_{\phi} = 0.39 \times 12 = 4.6cm$$

# การเพิ่ม Padding



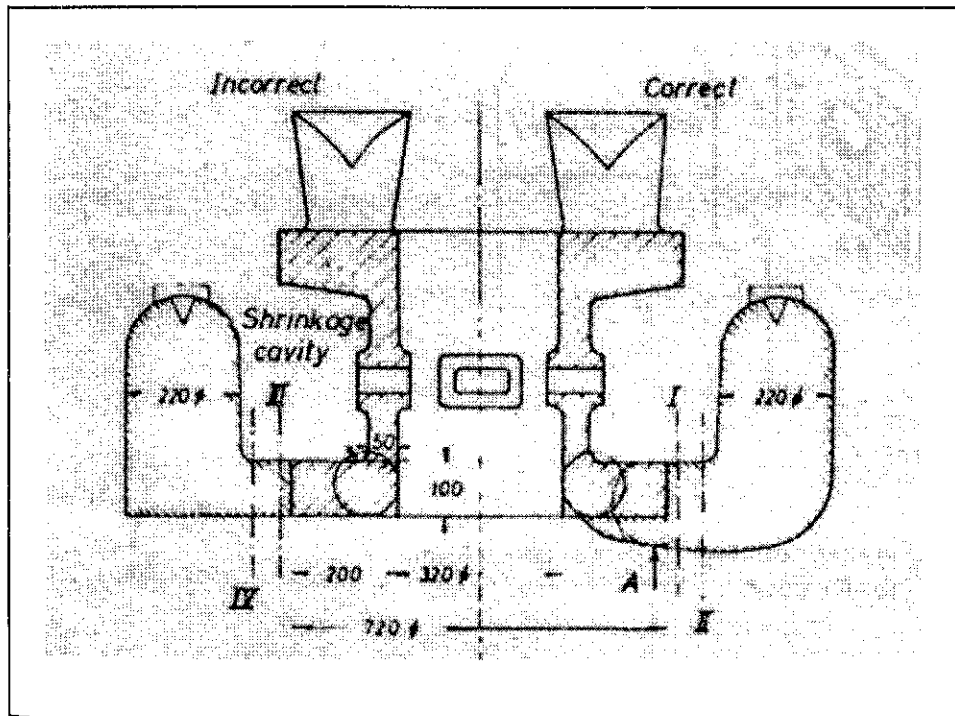
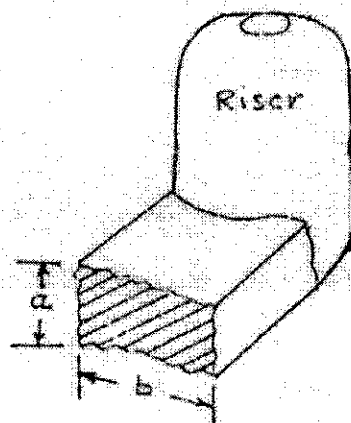
ภาพที่ 8.23 แสดงวิธีการเพิ่ม  
โพลีเมอร์ Padding

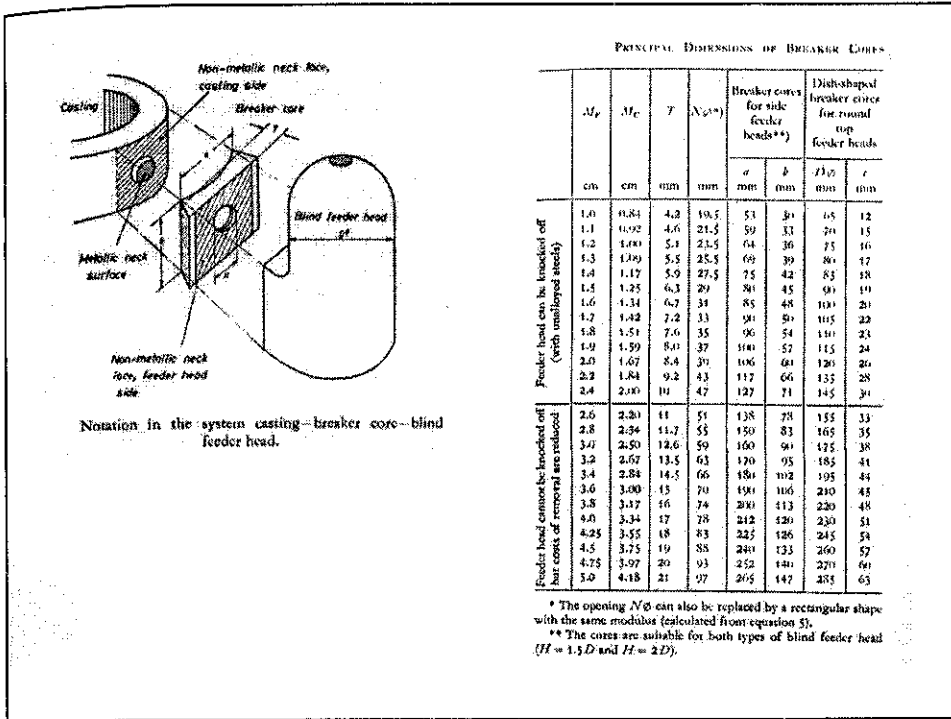


สำหรับ Riser แบบเปิด สามารถหา a และ b

ได้จากแผนภาพ 8.16 โดยคำนวณจากค่า

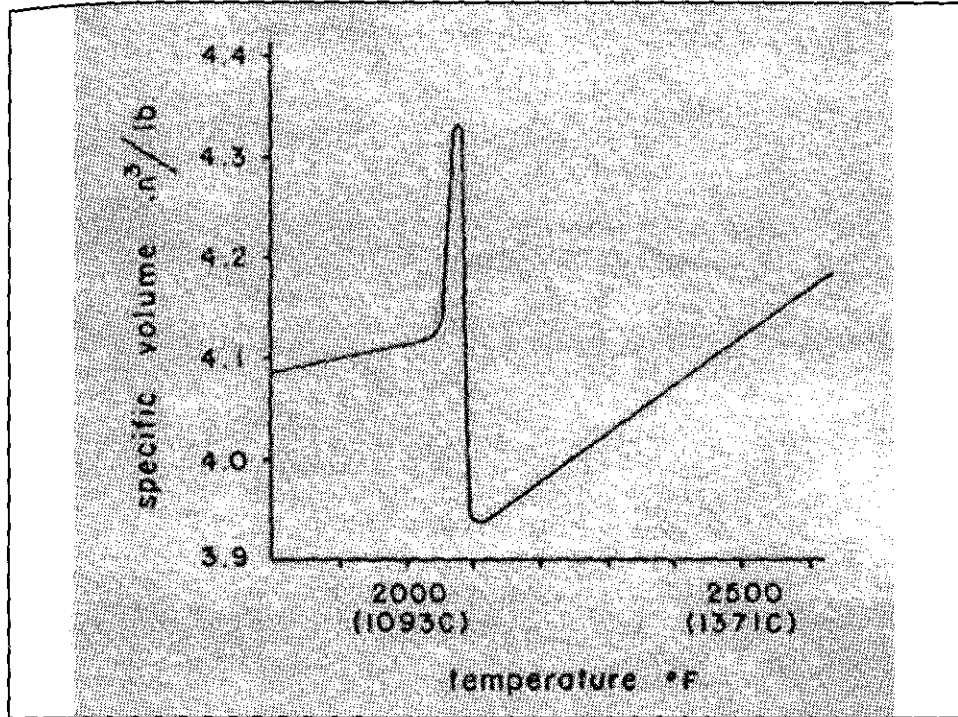
$$M_C : M_N : M_R = 1.0 : 1.1 : 1.2$$





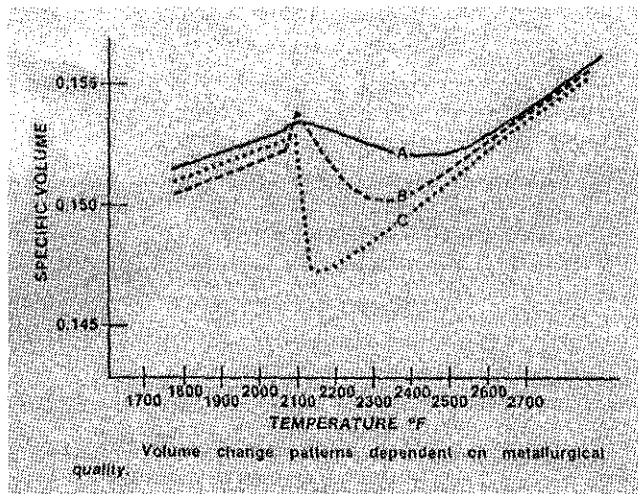
### การแก้ไขปัญหาการหดตัวโดยใช้โรเซอร์สำหรับเหล็กหล่อ

- จากที่กล่าวมาทั้งหมดคือการหาขนาดของ riser สำหรับกรหล่อเหล็กกล้า ซึ่งสามารถนำมาใช้กับการหล่อเหล็กหล่อสีขาวได้เลย โดยใช้ค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัวเท่ากับ 5.5%
- สำหรับเหล็กหล่อสีเทาและเหล็กหล่อเหนียวจะมีพฤติกรรมแตกต่างออกไป เนื่องจากการเกิด graphite ระหว่างการแข็งตัวทำให้มีการขยายปริมาตร ก่อนที่จะหดตัวลงมาอีกครั้งหนึ่ง

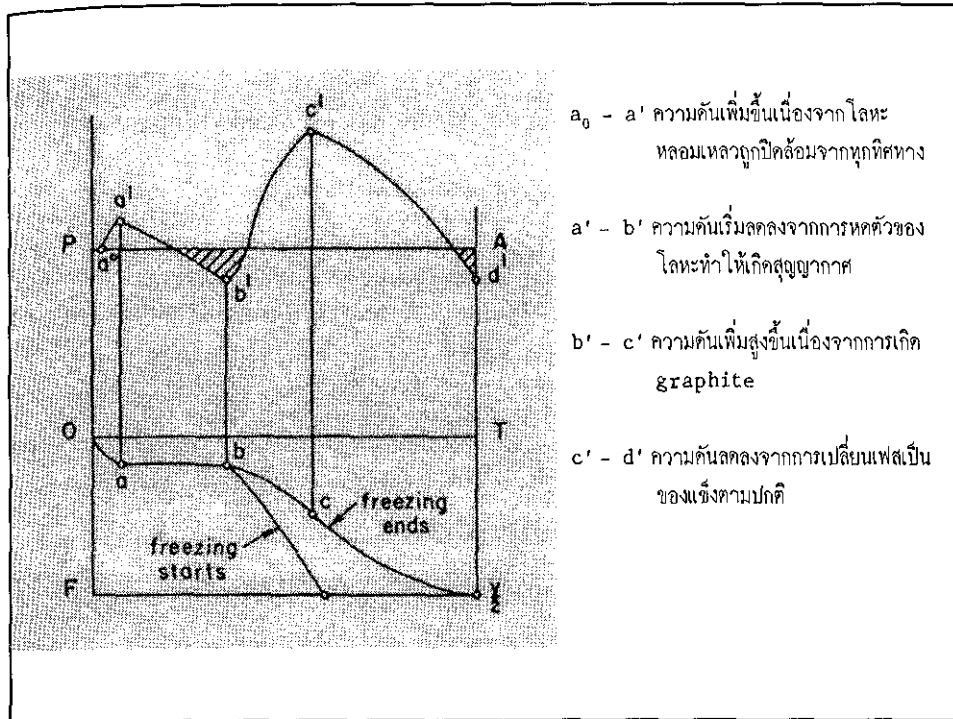


### ลักษณะการหดตัว

- ลักษณะการหดตัวของเหล็กหล่อสีเทาและเหล็กหล่อเหนียวมี 3 ลักษณะ





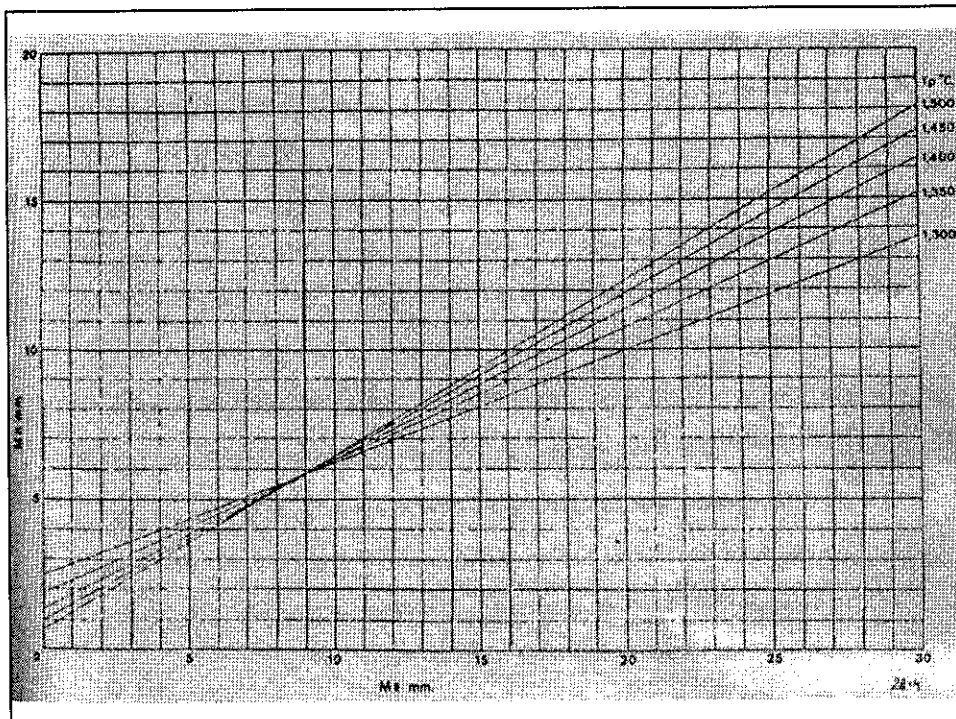


### การแก้ปัญหาการหดตัวทั้ง Primary และ Secondary

- Pressure Risering
- Pressure Relief Risering
- Riserless Design

## วิธี Pressure Risering

- ให้ส่วนต่อของ Riser กับชิ้นงานหล่อ มีค่าโมคูลัสน้อยกว่าโมคูลัสของชิ้นงานหล่อ
- เมื่อเกิดการแข็งตัวที่ผิวของชิ้นงาน น้ำโลหะจะถูกปิดล้อมด้วยของแข็ง รวมทั้งรอยต่อของ Riser
- เมื่อเกิด Graphite น้ำโลหะจะขยายตัวคั้นน้ำโลหะ แต่ไม่สามารถไหลออกไปทาง Riser ได้
- ความคืบหน้าเพิ่มขึ้นจะต้องเพียงพอต่อการชดเชย Secondary Shrinkage



## วิธี Pressure Relief Risering

- ใช้ Blind Riser ต่อกับส่วนที่มีโมดูลัสการเย็นตัวสูง
- ให้ส่วนต่อของ Riser กับชิ้นงานหล่อ มีค่าโมดูลัสมากกว่าโมดูลัสของชิ้นงานหล่อเล็กน้อย
- เมื่อเกิดการแข็งตัวของชิ้นงาน น้ำโลหะจะถูกปิดล้อมด้วยของแข็ง เมื่อเกิด Graphite น้ำโลหะจะขยายตัวคั้นน้ำโลหะ แต่ไม่สามารถไหลออกไปทาง Riser ได้เพราะใช้ Blind Riser
- เมื่อเกิด Secondary Shrinkage น้ำโลหะจาก Riser สามารถไหลไปชดเชยได้

## วิธี Riserless Design

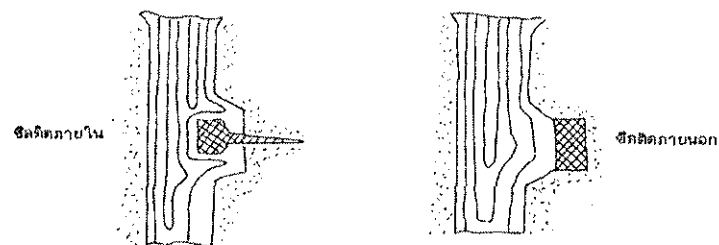
- อุณหภูมิเทไม่ควรเกิน 1350 องศาเซลเซียส เพื่อไม่ให้เกิดการหดตัวมาก
- ควรมี C.E. 4.2 - 4.25% Mn < 0.2% และควรทำ inoculation
- โมดูลัสการเย็นตัวไม่ควรต่ำกว่า 2.5 cm
- แบบทรายต้องมีความแข็งแรง เพื่อทนแรงคั้น
- ทางเดินน้ำโลหะจะต้องบางเพื่อให้แข็งตัวปิดการขยายตัวของน้ำโลหะ
- ต้องยึด Cope และ Drag เพื่อป้องกันการแยกของแบบหล่อ

## บทที่ 9 วิธีแก้การหดตัวของเหล็กโดยใช้ Chills

"Chills" หมายถึงส่วนที่เป็น โลหะในแบบหล่อที่ทำให้โลหะหลอมเหลวแข็งตัวเร็วขึ้นเพื่อให้การแข็งตัวของงานหล่อเป็นแบบ Directional Solidification

Chills มีสองประเภทคือ

Internal Chills และ External Chills



ภาพที่ 9.1

## Internal Chill

- เป็น Chill ที่ติดยื่นเข้าไปในงานหล่อ ทำให้น้ำโลหะบริเวณรอบ ๆ แข็งตัวเร็วขึ้น ทำให้น้ำโลหะบริเวณอื่นไหลมาชดเชยได้
- ต้องระวังเรื่องความสะอาด สนิม คราบน้ำมัน เศษทราย ความชื้น อาจทำให้เกิดการฝังตัวหรือฟองแก๊สเป็นของบกพร่องของงานหล่อ
- อาจใช้วิธีการเคลือบผิวด้วย Zn หรือ Sn หรือ Cu เพื่อป้องกัน สนิม แต่เมื่อนำไปใช้งานจะทำให้ชั้นเคลือบบางส่วนละลายไปบนผิวของชิ้นงาน ยกตัวอย่าง Fe-Sn ทำให้ความแข็งแรงต่ำลง Fe-Cu ถ้ามากเกินไปจะเป็น Metallic Inclusion

## Internal Chill

- Internal Chill แบ่งออกได้อีกเป็น 2 ประเภท
  - ชีลประเภทเชื่อมประสานติดต่อกับงานหล่อ  
(Weld-in Chills)
  - ชีลประเภทไม่เชื่อมประสานติดต่อกับงานหล่อ  
(Non-bonding internal chills)

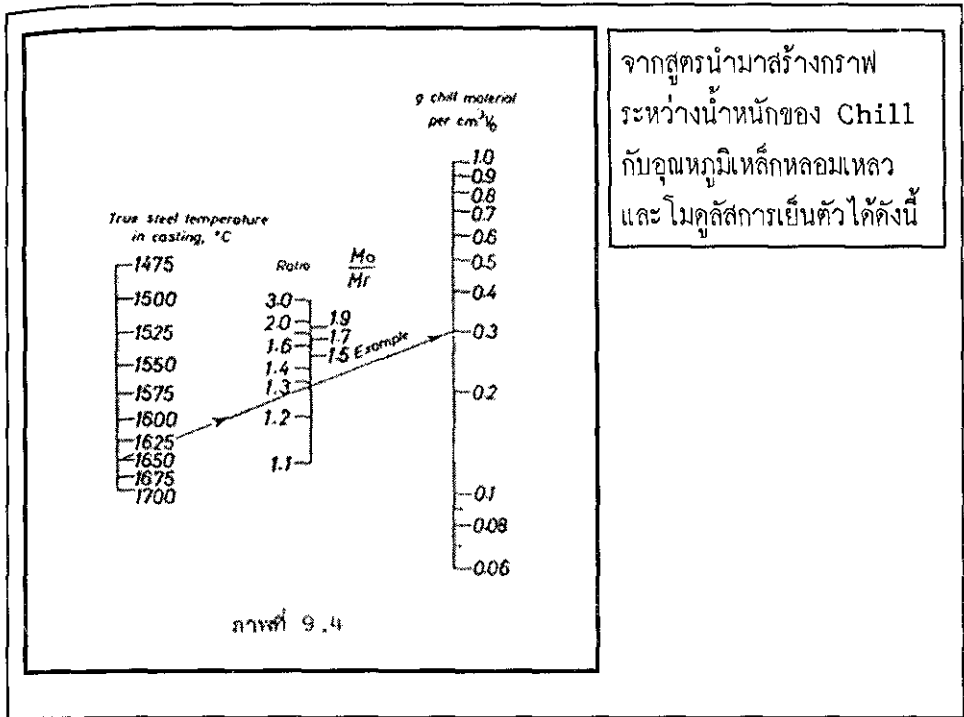
### Weld-in Chill

- สำหรับงานหล่อที่ต้องการคุณภาพสูง
- Chill จะเชื่อมประสานกับงานหล่อหลังจากรีดแบบ
- ควรมีส่วนผสมเหมือนหรือใกล้เคียงกับงานหล่อ เพื่อให้มีส่วนผสมทางเคมีต่อเนื่องกับบริเวณอื่น

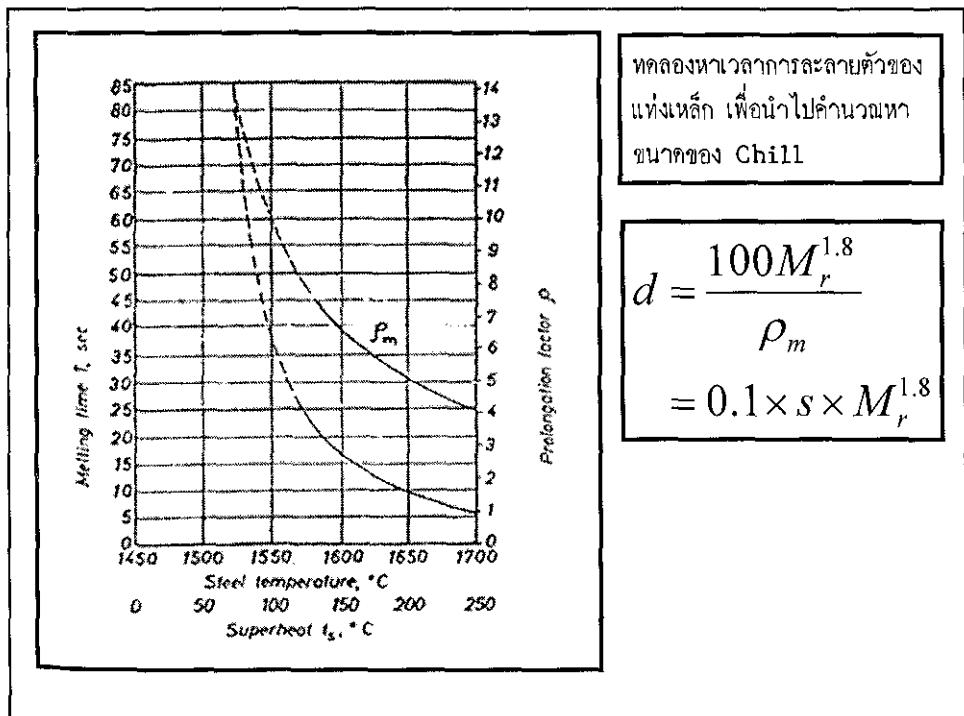
### Weld-in Chill

- มีหลักการคำนวณหาน้ำหนักของ Chill คือต้องให้บริเวณที่ต้องการมีโมดูลัสการเย็นตัวต่ำกว่ารอบข้าง
- น้ำหนักของ Chill หาได้จากสูตร

$$W_{ch} = f \times \gamma \times V_0 \times \frac{(M_0 - M_r)}{M_0}$$



จากสูตรนำมาสร้างกราฟ  
ระหว่างน้ำหนักของ Chill  
กับอุณหภูมิเหล็กหลอมเหลว  
และ โมดูลัสการเย็นตัว ได้ดังนี้

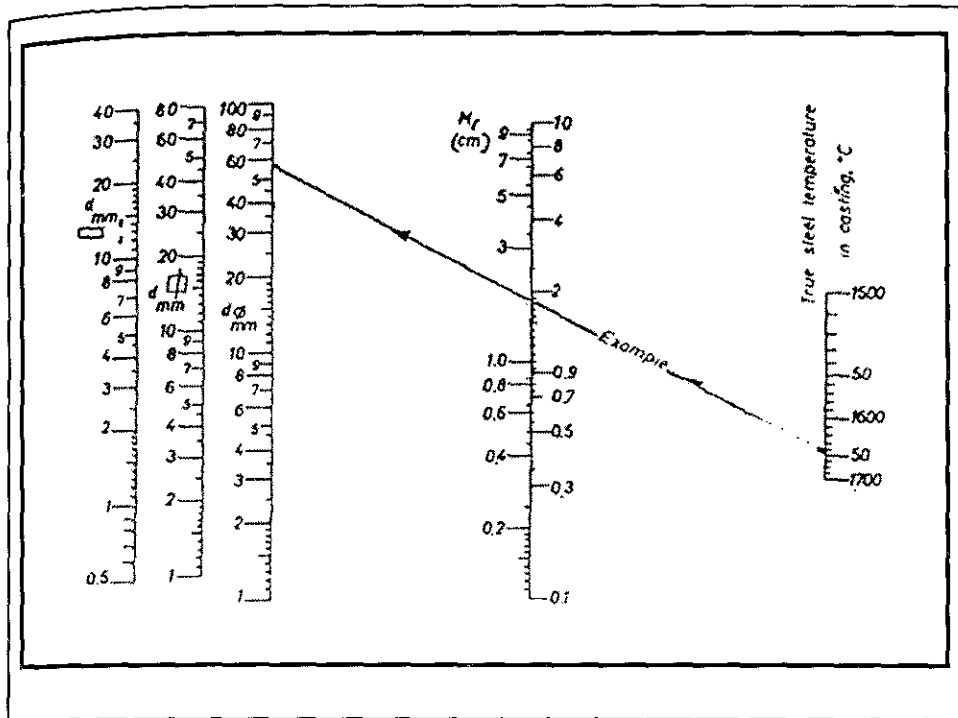


หาคงหาเวลาการละลายตัวของ  
แท่งเหล็ก เพื่อนำไปคำนวณหา  
ขนาดของ Chill

$$d = \frac{100M_r^{1.8}}{\rho_m}$$

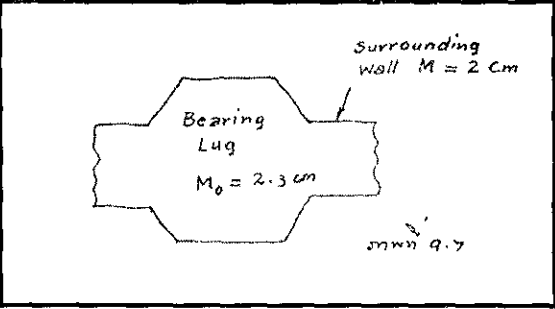
$$= 0.1 \times s \times M_r^{1.8}$$





ตัวอย่าง

มี Bearing Lug และ Surrounding wall ดังภาพ จงคำนวณหาขนาดและน้ำหนักของ Chill แบบ Weld-in ที่เหมาะสม



$$M_r = 0.9M$$

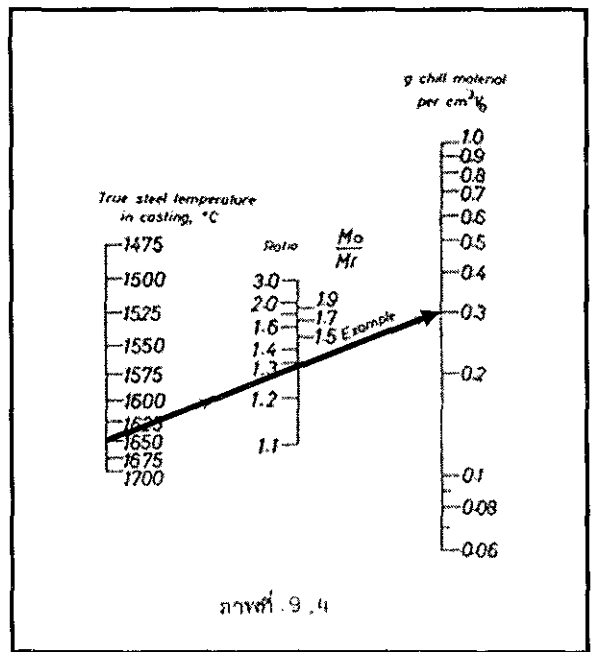
$$= 0.9 \times 2.0 = 1.8$$

$$\frac{M_0}{M_r} = \frac{2.3}{1.8} = 1.28$$

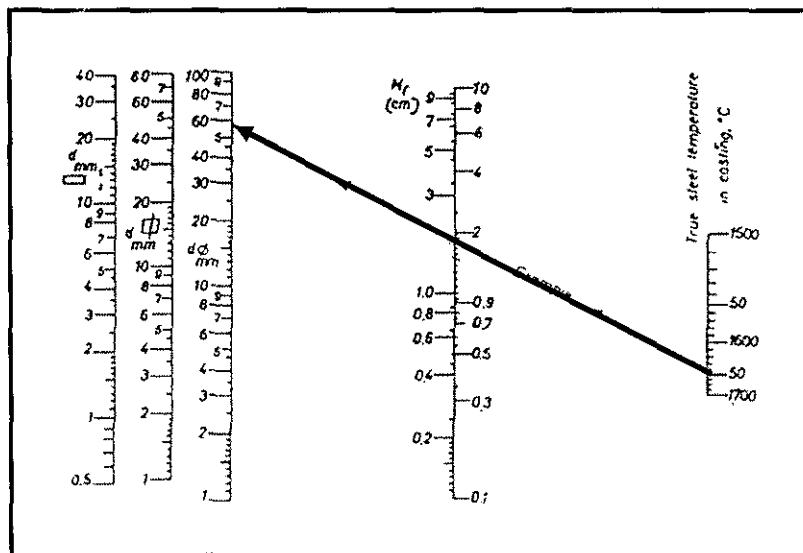
กำหนดให้อุณหภูมิเหล็ก  
หลอมเหลวเท่ากับ 1650  
องศาเซลเซียส นำไปอ่าน  
กราฟจะได้ว่า Chill ต้อง  
มีน้ำหนัก 0.3 g/cm<sup>3</sup>  
ถ้าให้ Bearing Lug  
มีขนาด 1000 cm<sup>3</sup>

$$W_{ch} = 0.3 \times 10,000$$

$$= 3kg$$



หาขนาดของ Chill จากภาพ 9.6



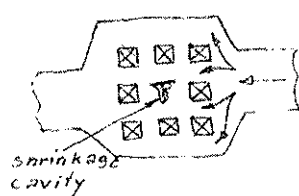
จะได้ขนาด  $d = 56 \text{ mm}$  หรือถ้าเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส  $46 \times 46 \text{ mm}$

ถ้าให้เป็นแท่งสี่เหลี่ยมจัตุรัสและต้องการให้มีน้ำหนัก  $3 \text{ kg}$  จะต้องใช้ความยาวเท่ากับ

$$3000 \text{ g} = (0.46 \text{ cm})(0.46 \text{ cm})(7.87 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}) \times l$$

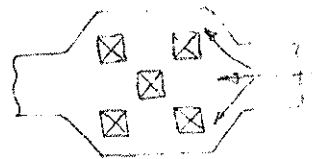
$$l = \frac{3000}{16.6} = 180.7 \text{ mm}$$

ในการคิด Chill ถ้าขนาดของ Bearing Lug สั้นกว่าความยาวของ Chill มาก อาจใช้ Chill ขนาดเล็กหลายตัว ตำแหน่งที่วาง Chill ไม่ควรชิดขวงการไหลตัวของน้ำโลหะและกระจายตัวสม่ำเสมอเพื่อให้เป็น Directional Solidification ไม่เช่นนั้นอาจทำให้เกิด Shrinkage บริเวณที่ไม่มี Chill



การเลือกขนาดและ  
การวางชิลไม่ถูกต้อง

ภาพที่ ๗.๘

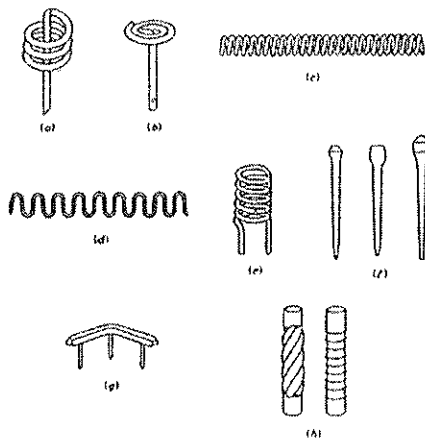


การเลือกขนาดและ  
การวางที่ดี

จะเห็นได้ว่าในการคำนวณขนาดและน้ำหนักของ Chill ต้องทราบอุณหภูมิหลอมเหล็กเสียก่อน ซึ่งถ้าหากในการหลอมเหล็กจริงใช้อุณหภูมิที่ต่างจากการคำนวณอาจทำให้เกิดข้อบกพร่องได้โดย

ถ้าอุณหภูมิสูงเกินไป ทำให้น้ำหนักของ Chill ที่คิดไว้้น้อยกว่าที่ควร ทำให้ Chill ละลายมากและอาจขาดลอยไปอยู่ที่ตำแหน่งที่ไม่ต้องการได้

ถ้าอุณหภูมิต่ำเกินไป ทำให้น้ำหนักของ Chill ที่คิดไว้มากกว่าที่ควร ทำให้ Chill ละลายน้อยเกินไปและไม่เชื่อมประสานกับชิ้นงานเป็นข้อบกพร่อง

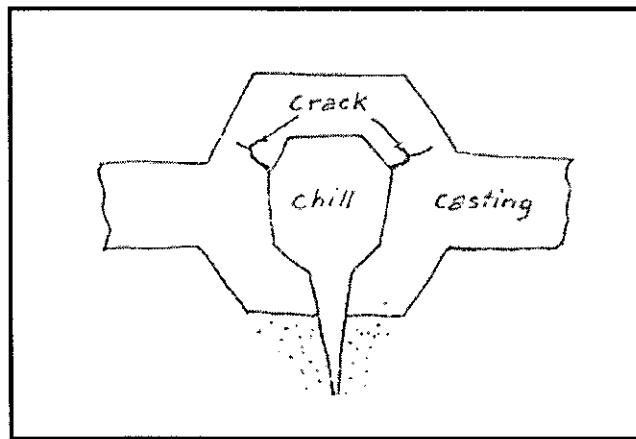


ภาพที่ 9.9 Examples of internal chills. (a) Chill coil nail, (b) flathead chill coil nails, (c) chill coils, (d) grid chill, (e) hub chill, (f) chill nails, (g) spider chill, (h) chill rods. (Courtesy of Fanner Manufacturing Co.)

เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวจริงอาจออกแบบรูปร่างของ Chill ให้มีรูปร่างต่าง ๆ กัน ทำให้เกิดการเชื่อมประสานมากขึ้นและได้รอยเชื่อมที่มั่นคงแข็งแรง

## Non-bonding Internal Chill

ใช้สำหรับงานหล่อที่หล่อเสร็จแล้วจะมีการเจาะหรือกลึงออกใน  
ภายหลัง ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องให้ Chill เชื่อมประสานกับ  
งานหล่อ

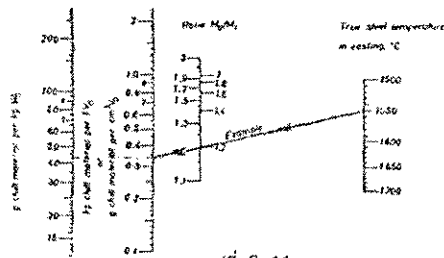


Chill ต้องมีการหดตัวใกล้เคียงกับงานหล่อ  
ไม่เช่นนั้นอาจทำให้เกิด Crack ได้

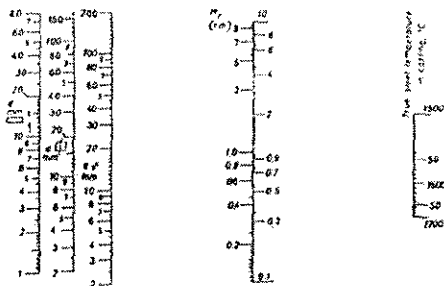
การคำนวณน้ำหนักและขนาดของ Chill อาศัยหลักการเดียวกันกับ  
 การหาขนาดและน้ำหนักของ Weld-in Chill โดยไม่คิดค่าความ  
 ร้อนแฝงจากการละลายของ Chill คิดแต่ความร้อนที่ทำให้ Chill  
 เพิ่มจาก 30 ไปเป็น 1450 องศาเซลเซียส

$$W_{ch} = f \times \gamma \times V_0 \times \frac{(M_0 - M_r)}{M_0}$$

$$d = 0.2 \times s \times M_r^{1.8}$$



รูปที่ 9.11



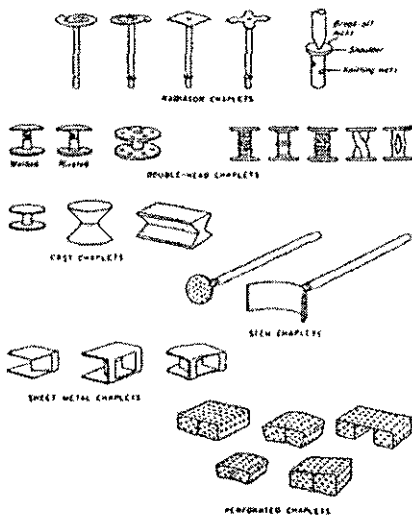
## Chaplet

ในการใช้ Core Sand ขนาดใหญ่หรือมี Core Print ล้น อาจต้องใช้ Chaplet ช่วยในการค้ำยันไว้

Chaplet จะต้องทำจากโลหะที่มีส่วนผสมเช่นเดียวกับงานหล่อ โดยทำหน้าที่คล้ายกับ Chill ไปในตัว

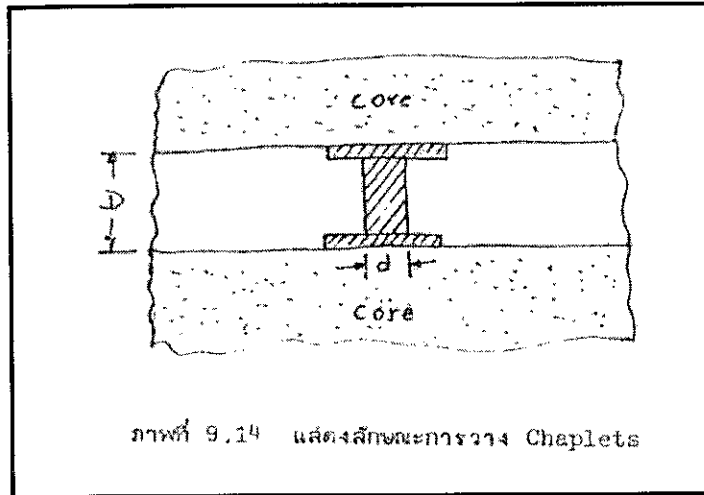
ในการคำนวณหาขนาดของ Chaplet มีหลักการเหมือนกับการคำนวณขนาด Chill แบบ Non-bonding internal chill เพื่อให้ Chaplet ละลายเพียงเล็กน้อยจึงจะสามารถยึดตำแหน่งให้อยู่กับที่ตลอดการแข็งตัวของชิ้นงาน แต่ถ้า Chaplet ละลายมากเกินไปอาจถูกพัดพาไปบริเวณอื่นที่ไม่ต้องการ

## Chaplet รูปร่างต่าง ๆ



ภาพที่ 9.13 Chaplets. (From H.W.Dielert)



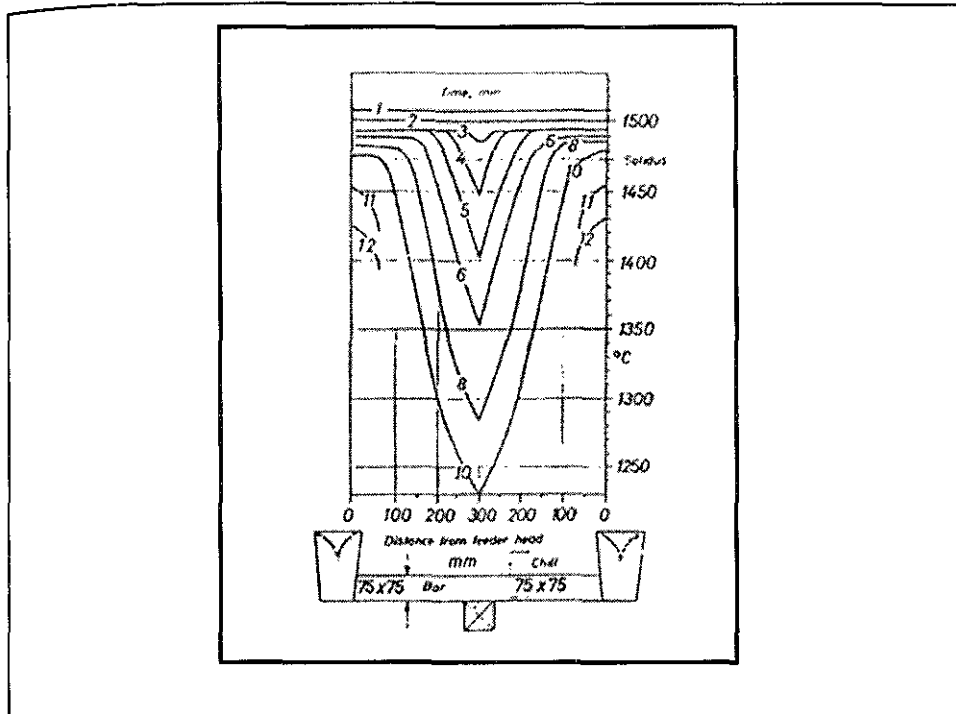


ภาพที่ 9.14 แสดงลักษณะการวาง Chaplets

$$d = 0.2 \times s \times M_r^{1.8}$$

### External Chill

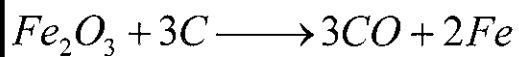
- ทำให้ได้ผลเหมือนกับ End Effect เพิ่ม ทำให้ประหยัดจำนวน Riser หรือในอีกทางหนึ่งคือทำให้ Casting Yield สูงขึ้น
- ข้อได้เปรียบของ External chill คือจะไม่ไปขัดขวางการไหลของน้ำโลหะ



- ข้อเสียเปรียบของ External Chill คืออาจเกิดปัญหาขึ้นดังนี้
  - ปัญหาเรื่องความสะอาดของ Chill
  - ปัญหาเรื่อง Chill มี pin hole บริเวณผิว
  - ปัญหาเรื่องการหดตัวของงานหล่อบริเวณรอยต่อระหว่าง Chill กับทรายแบบ
  - ปัญหาเรื่องรูปร่างและขนาดที่เหมาะสม

### ปัญหาเรื่องความสะอาดของ Chill

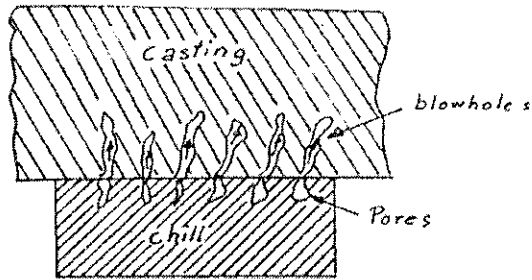
ส่วนใหญ่ Chill จะทำจากเหล็กกล้าคาร์บอนสูงเพื่อให้มีความแข็งแรงมากสามารถนำมาใช้ใหม่ได้หลายครั้ง  
ถ้าหาก Chill เป็นสนิม เมื่อสัมผัสกับโลหะหลอมเหลวจะทำให้เกิดปฏิกิริยา



แก๊สที่เกิดขึ้นจะทำให้เกิดรูพรุนเล็ก ๆ ในชิ้นงานบริเวณที่สัมผัสกับ Chill ดังนั้นจึงควรทำความสะอาด Chill ก่อนหรืออาจเคลือบแลคเกอร์บาง ๆ ป้องกันการเกิดสนิม ถ้าหากทำแบบทิ้งไว้ค้างคืนจะมีหยดน้ำเกาะที่ Chill ต้องเผาแบบใหม่ก่อนหน้าโลหะ

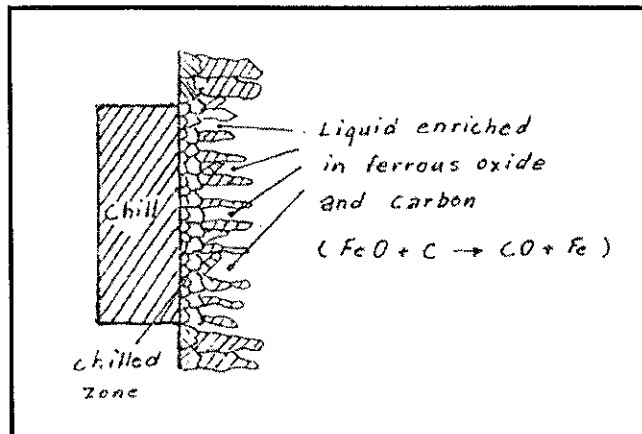
เนื่องจากปฏิกิริยาเป็น Exothermic reaction อาจจะทำให้ Chill หลอมละลายเชื่อมติดกับงานหล่อเป็นจุด ๆ สามารถต้อออกได้ เพราะรอยเชื่อมจะมีความแข็งแรงต่ำ เนื่องจากจะมี Carbon น้อยเพราะปฏิกิริยาจะลดปริมาณ Carbon ในน้ำโลหะ

ปัญหาเรื่อง Chill มี pin hole บริเวณผิว



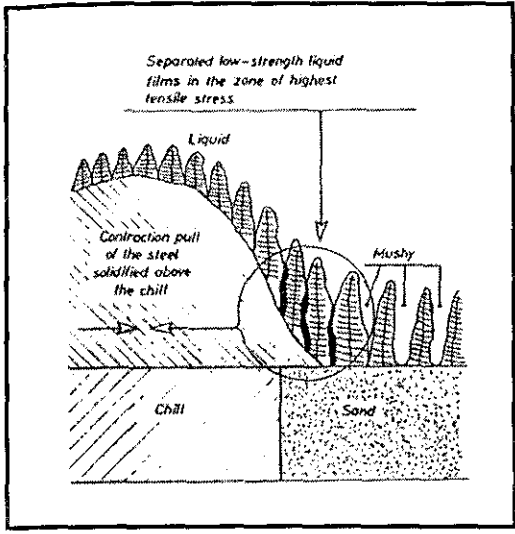
ภาพที่ 9.16 แสดงลักษณะที่เกิด blowholes

ถ้าผิวของ Chill มี pin hole จะทำให้อากาศซึ่งอยู่ในนั้น เมื่อได้รับความร้อนอากาศจะขยายตัวและแทรกตัวเข้าไปในน้ำโลหะเกิดเป็น Blow hole ที่ผิวชิ้นงาน

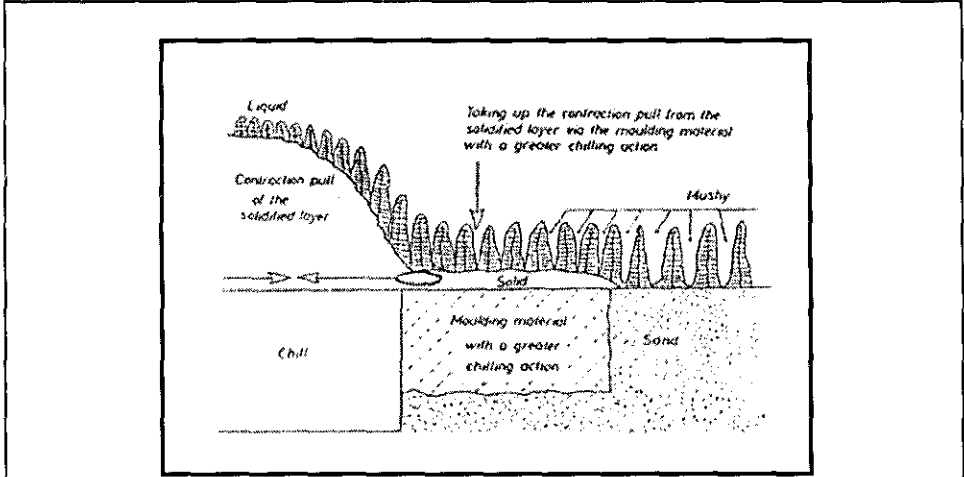


ถ้าในน้ำโลหะมีปริมาณ ferrous oxide มาก จะทำปฏิกิริยากับ Carbon ให้แก๊ส CO เกิดเป็นรูพรุนได้เช่นกัน

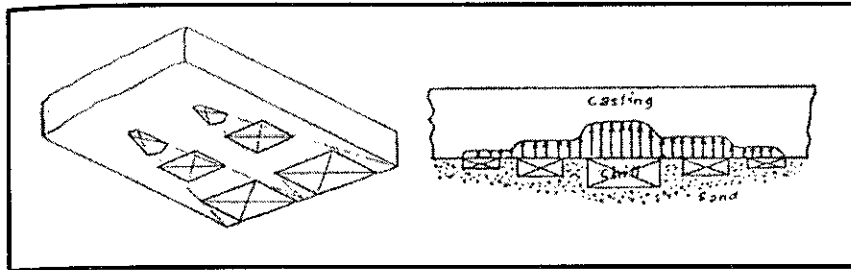
ปัญหาเรื่องการหดตัวของงานหล่อบริเวณรอยต่อของ Chill กับทรายแบบ



เมื่อโลหะบริเวณ Chill เริ่มแข็งตัวจะเกิดการหดตัว ดึงเอาเนื้อโลหะบริเวณรอยต่อระหว่าง Chill กับทรายแบบ ซึ่งมีลักษณะแข็งกึ่งเหลว (Mushy State) ทำให้เกิด Crack ได้

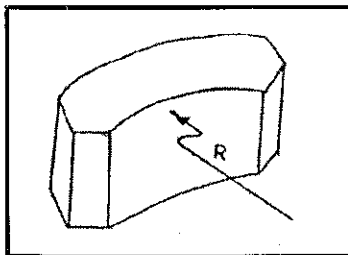


วิธีการแก้ไขคือใช้ทรายที่มีความสามารถในการนำความร้อนสูง เช่น Silicon carbide (SiC), Magnesite (MgCO<sub>3</sub>), Chromite sand หรือ Zircon sand มาใช้แทนบริเวณรอยต่อ เพื่อลดความแตกต่าง

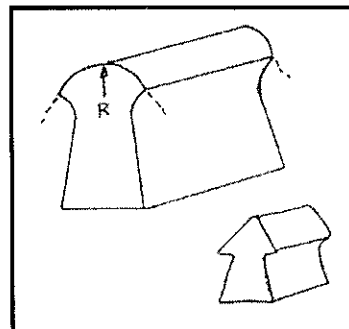


วิธีการแก้ไขอีกวิธีหนึ่งคือการใช้ Chill ที่ขนาดบางและเล็กลง  
เรียงกัน เพื่อลดความแตกต่างในการถ่ายเทความร้อน ดังแสดง  
ในภาพ

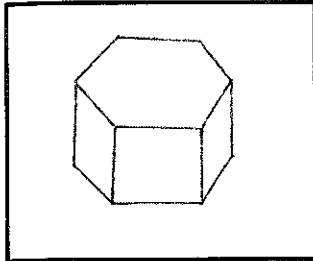
ปัญหาเรื่องรูปร่างและขนาดที่เหมาะสมของ External Chill



งานหล่อที่มีส่วนโค้งหรือเป็นมุมแหลม Chill  
จะต้องมีรูปร่างเป็นส่วนโค้งหรือมุมแหลมตามไป  
ด้วย (ดังภาพแสดง)

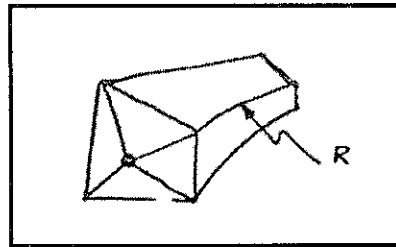


ใช้สำหรับบริเวณ Junction เช่นรูปตัว T,  
L, X มีหลายขนาดโดยมีค่า R ต่างกัน  
Chill ประเภทนี้เรียกว่า "Fillet Chills"



Chill บริษัทฐานหกเหลี่ยม ใช้ในกรณีที่ต้องการดึงความร้อนออกจากงานหล่อจำนวนมาก ใช้กับงานหล่อที่หนา ใช้ได้หลายด้านตามลักษณะงานหล่อ

Chill ที่มีลักษณะแหลมคล้าย Pyramid ใช้กับส่วนโค้ง หรือส่วนที่แหลมคม เรียกว่า "Wedge Chill"

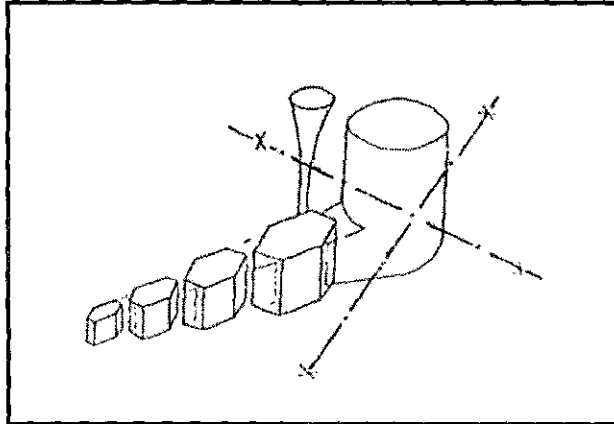


โลหะที่ใช้ทำ Chill ส่วนใหญ่เป็นเหล็กกล้าคาร์บอนสูงหรือปานกลาง ทั้งนี้เพื่อต้องการความแข็ง จึงจะมีอายุการใช้งานยาวนาน

Chill ที่จะนำมาใช้จะต้องมีเนื้อแน่นไม่มีโพรงจากการหดตัว ไม่ว่าจะโพรงที่เปิดสู่ภายนอกหรือโพรงภายใน Chill

สำหรับโพรงที่เปิดสู่ภายนอกจะทำให้เกิด Blow hole ดังที่ได้กล่าวไว้แล้ว

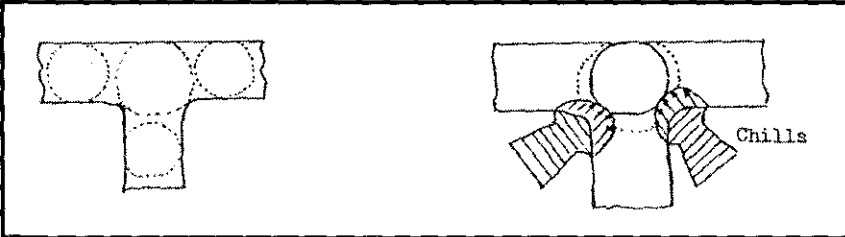
สำหรับโพรงภายใน Chill จะทำให้ความสามารถในการนำความร้อนต่ำลง



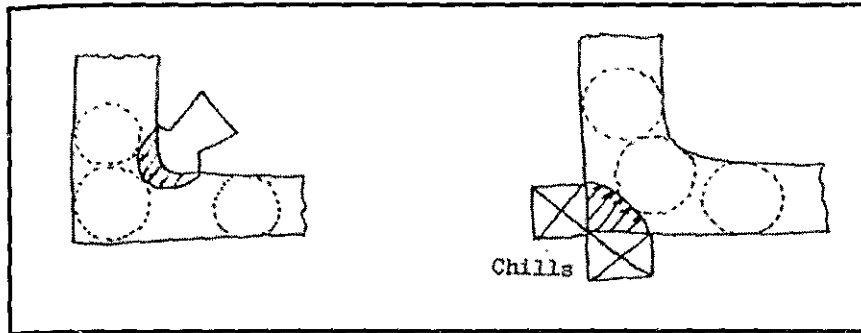
ในการหล่อ Chill จะต้องเรียงลำดับขนาด Chill จากเล็กไปหาใหญ่ โดยให้ชิ้นใหญ่อยู่ใกล้ Riser เพื่อป้องกันโพรงจากการหดตัว Chill แผ่นสามารถใช้เหล็กกล้าแผ่นมาตัด ลดค่าใช้จ่ายได้

การแก้ปัญหา Hot tear ของ Junction โดยการใช้ Chill

ที่บริเวณ Junction จะโลหะจะแข็งตัวช้าที่สุด เมื่อส่วนอื่นแข็งก่อนจะหดตัวดึงทำให้เกิด hot tear ที่ junction และเนื่องจากที่ junction แข็งตัวช้าที่สุดจึงทำให้เกิด shrinkage บริเวณนั้น ซึ่งปัญหานี้สามารถแก้ไขได้ด้วยการใช้ Chill ทำให้บริเวณ junction แข็งตัวเร็ว โดยดูจากขนาดของวงกลมลึบมีสัดส่วนต่าง ๆ ที่ T junction สามารถใช้ fillet chill แก้ปัญหาได้โดยทำให้วงกลมมีขนาดเล็กลงดังภาพ





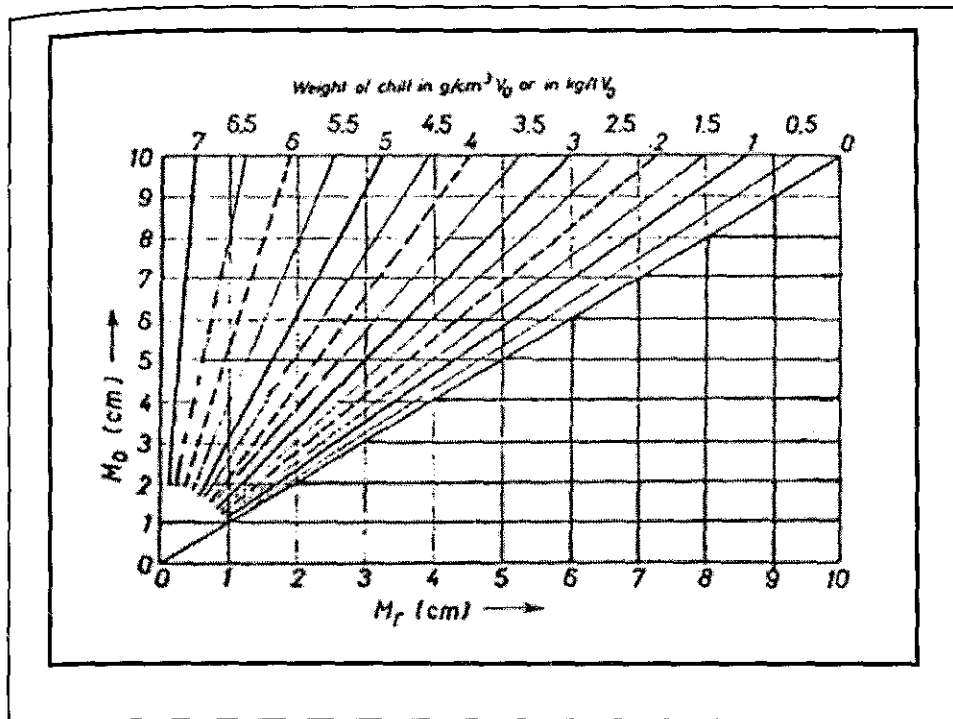


สำหรับ L junction ถ้าแก้ปัญหาด้วย fillet chill จะสามารถ  
แก้ปัญหา hot tear ได้ดีถึงภาพ แต่จะแก้ปัญหาการหดตัวไม่ได้ เพราะทำให้  
บริเวณค้ำบนมีวงกลมแคบลงด้วยเช่นกัน ถ้าลดขนาด fillet อาจจะทำให้  
เชื่อมติดกับชิ้นงาน จึงเปลี่ยนมาใช้ chill แผ่นติดค้ำมุมแหลม ดังภาพ

### การคำนวณน้ำหนักของ External Chill

$$W_{ch} = 7.4 \times V_0 \times \frac{M_0 - M_r}{M_0}$$

- $W_{ch}$  = weight of chill
- $V_0$  = volume of molten metal without chill
- $M_0$  = modulus of molten metal without chill
- $M_r$  = modulus of molten metal with chill



ตัวอย่าง

Bearing Lug มีค่าโมดูลัสการเย็นตัวเท่ากับ 3 cm และ  
 Surrounding wall มีค่าโมดูลัสการเย็นตัวเท่ากับ 2 cm  
 ต้องติด external chill หนักเท่าไร?

$$M_o = 3 \text{ cm}$$

$$M = 2 \text{ cm}$$

ถ้าต้องการให้ bearing lug มีโมดูลัสต่ำกว่า surrounding wall 10%

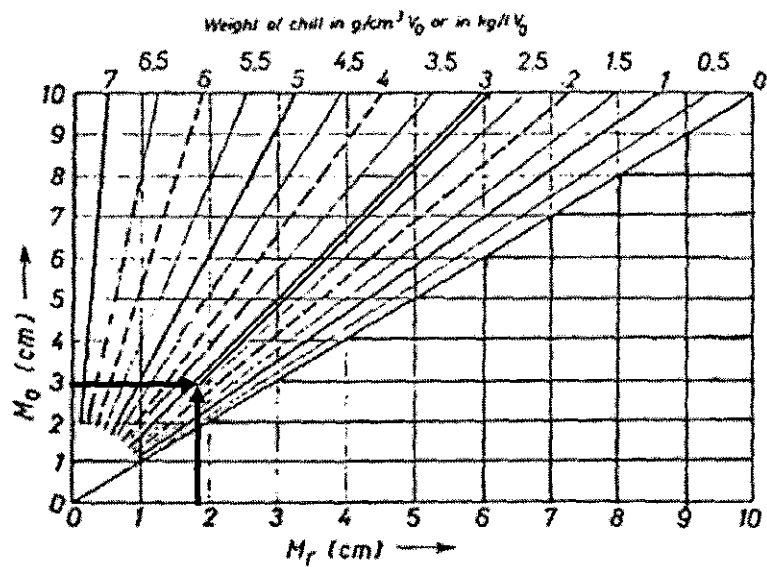
$$M_r = 2 - (2 \times (10/100)) = 1.8$$

$$W_{ch} = 7.4 \times V_0 \times \frac{M_0 - M_r}{M_0}$$

$$= 7.4 \times V_0 \times \left( \frac{3 - 1.8}{3} \right)$$

$$= 2.96 V_0$$

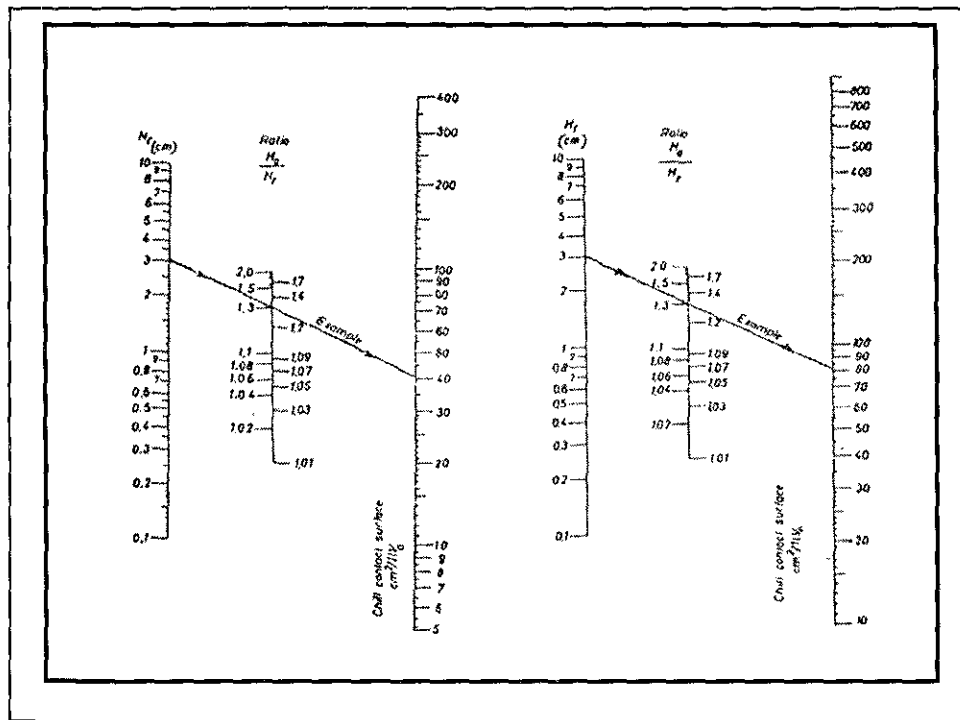
$$\frac{W_{ch}}{V_0} = 2.96$$



## การคำนวณพื้นที่ของ External Chill

$$A_{ch} = V_0 \times \frac{M_0 - M_r}{M_0 M_r}$$

- $A_{ch}$  = area of chill
- $V_0$  = volume of molten metal without chill
- $M_0$  = modulus of molten metal without chill
- $M_r$  = modulus of molten metal with chill



การคำนวณหาน้ำหนักของทรายตัวนำความร้อน

$$W_{ch} = V_0 \frac{(M_0 - M_r)}{M_0} \times \frac{\rho_{ch}(L + S)_m}{\Delta T_{ch} \times C_{p_{ch}}}$$

$W_{ch}$  = weight of chill  
 $V_0$  = volume of molten metal without chill  
 $M_0$  = modulus of molten metal without chill  
 $M_r$  = modulus of molten metal with chill  
 $\rho_s$  = density of sand  
 $L$  = latent heat of fusion  
 $S$  = sensible heat (1550 °C → 1450 °C)

การคำนวณหาพื้นที่ของทรายตัวนำความร้อน

$$A_{ch} = V_0 \times \frac{M_0 - M_r}{(Y - 1)M_0 M_r}$$

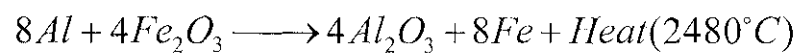
$A_{ch}$  = area of chill  
 $V_0$  = volume of molten metal without chill  
 $M_0$  = modulus of molten metal without chill  
 $M_r$  = modulus of molten metal with chill  
 $Y$  = molding sand coefficient = 1 (silica sand)

วัสดุตัวนำความร้อน	Y	$\gamma_{ch}$	$t_{ch}$	$C_{ch}$	
แมกนีไซต์	1.22	2.8	600	0.25	
ทรายเซอร์คอน	1.08	3.0	35	0.24	
ซิลิกอนคาร์ไบด์	1.27	2.4	500	0.23	
กราฟไฟต์	เกิดช่องว่าง	1.8	2.1	500	0.36
	ไม่เกิดช่องว่าง	2.6			
ซิลิกาตัวยว	เกิดช่องว่าง	2.0	7.8	600	0.16
	เหล็กกล้า	3.0			

## บทที่ 10 การใช้วัสดุให้ความร้อนบริเวณไรเซอร์ Exothermic Materials

### Exothermic Materials

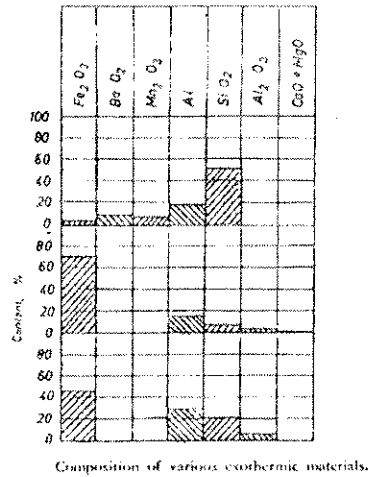
- ทำหน้าที่ให้ความร้อนแก่บริเวณ Riser ทำให้ Riser ใช้เวลาในการแข็งตัวนานและสามารถชดเชยการหดตัวของงานหล่อได้ตลอดระยะเวลาการแข็งตัว
- ส่วนใหญ่ทำจากผง Al ผสมกับ Oxide ของโลหะ ที่ทำปฏิกิริยาแล้วเกิด Exothermic reaction เช่น



- สำหรับโลหะที่มีจุดหลอมตัวต่ำจะทำให้อุณหภูมิบริเวณ Riser สูงขึ้น แต่ถ้าเป็นโลหะที่มีจุดหลอมตัวสูงจะทำให้การลดลงของอุณหภูมิช้าลงเท่านั้น

## Exothermic Materials

ส่วนผสมของ exothermic materials ได้แก่  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{BaO}_2$ ,  $\text{Mn}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ดังภาพ



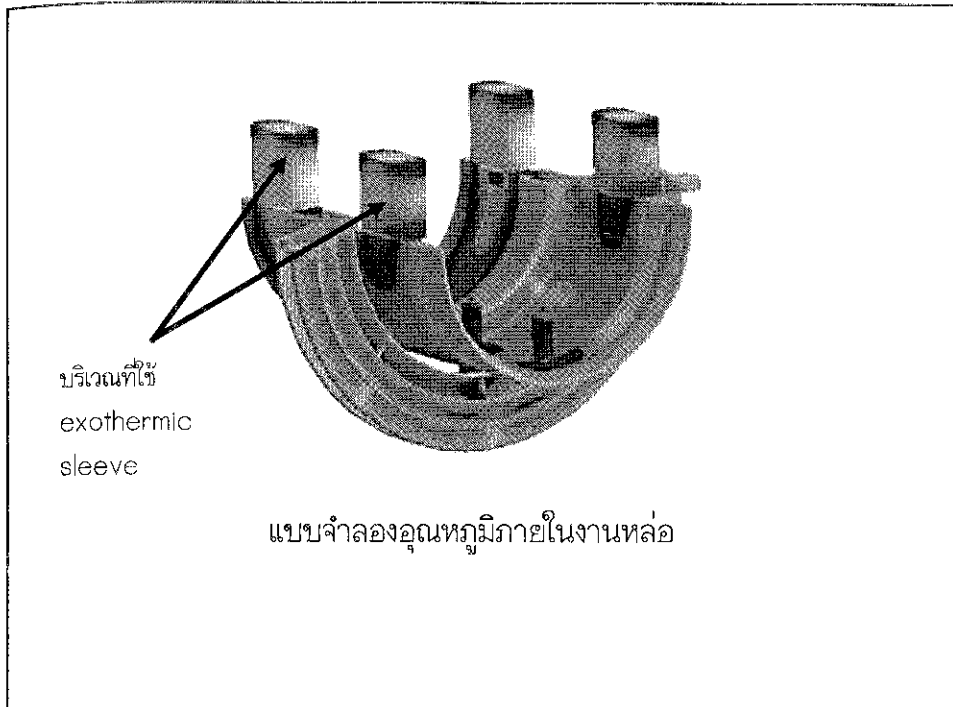
Composition of various exothermic materials.

ภาพที่ 10.1

## Exothermic Materials

- การใช้ exothermic materials จะมีการใช้ 3 วิธีได้แก่
  - วิธีใส่ทางตอนบนของโรเตอร์ในรูปแบบผง (Antipiling Powder)
  - วิธีใช้ทำเป็นปลอกโรเตอร์ (Exothermic Sleeves)
  - ใช้ 2 วิธีร่วมกัน



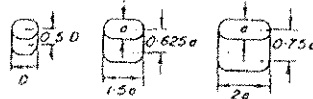


### Antipiping powder

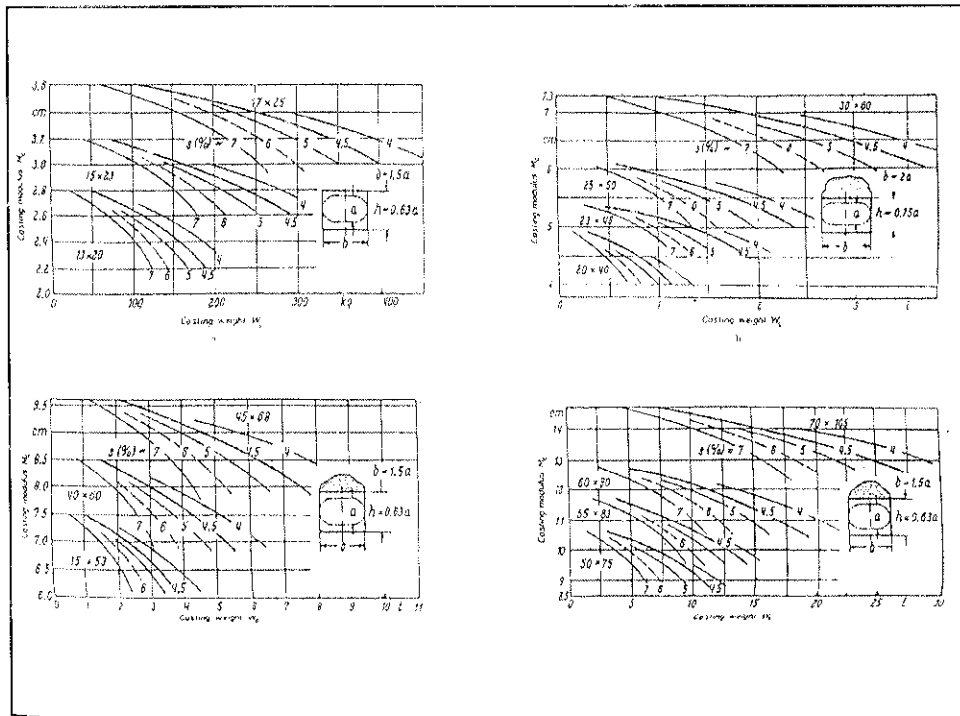
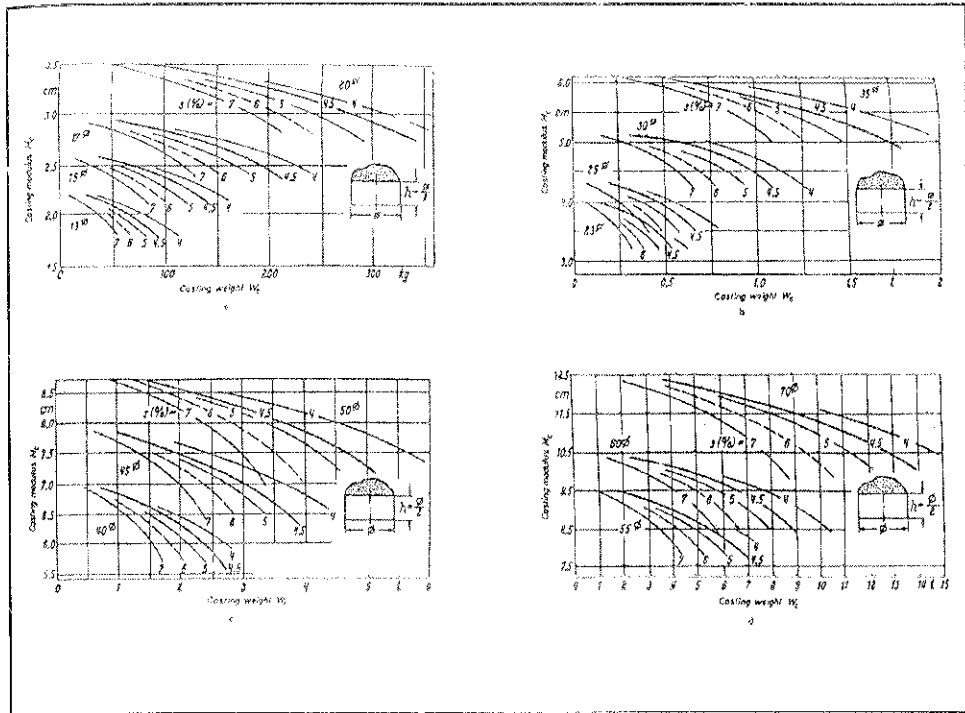
- เมื่อเทน้ำโลหะจนเต็มแบบล้นขึ้นมายังไรเซอร์ จะทำการเติมผง exothermic material ลงไปปกคลุมน้ำโลหะบริเวณไรเซอร์ ซึ่งจะทำให้เกิดปฏิกิริยาคายความร้อน และช่วยปิดทางการถ่ายเทความร้อนแบบ Radiation ทำให้น้ำโลหะบริเวณไรเซอร์แข็งตัวช้าลง
- ปกติใช้ไม่เกิน 17% ของน้ำหนักโลหะในไรเซอร์
- ถ้าใช้ในปริมาณที่เหมาะสมจะทำให้โลหะไม่แข็งตัวเป็นรูปกรวย จึงเป็นที่มาของชื่อ Anti - Piping powder คือเป็นสารต่อต้านการเกิดลักษณะเป็นท่อนของไรเซอร์

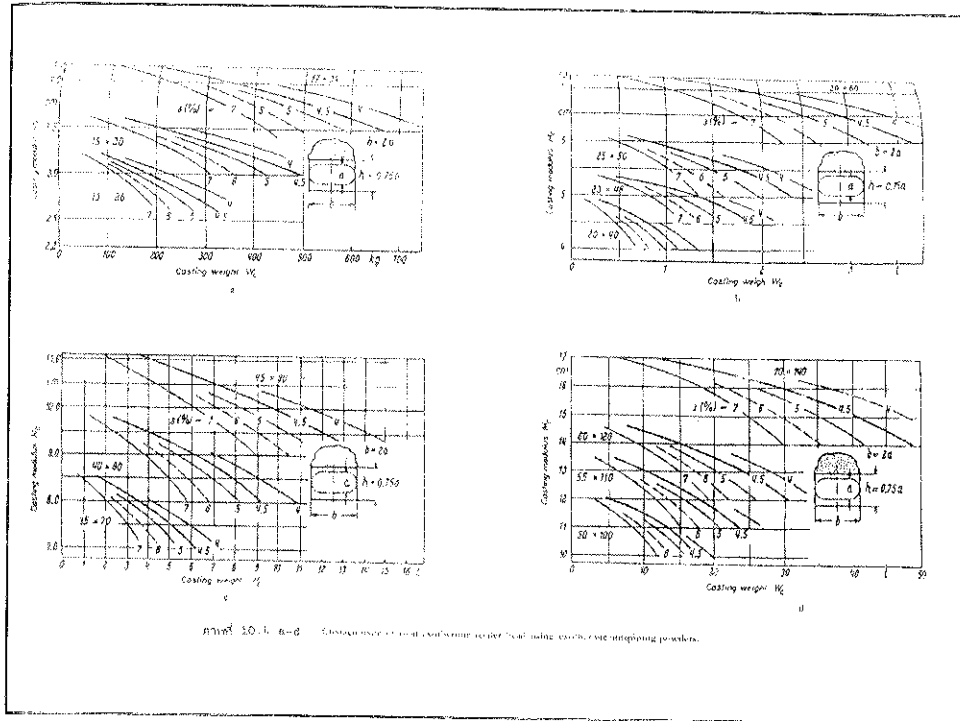
## Antipiping powder

- ปริมาณของ antipiping powder สามารถหาได้จากตาราง 10.1 ซึ่งใช้ได้กับกรณีที่โลหะมีอัตราการหดตัว 4 - 5% เท่านั้น
- แผนภาพ 10.2 - 10.4 ใช้ในการคำนวณขนาดของโรเซอร์จากน้ำหนักของงานหล่อและโมดูลัสการเย็นตัวของงานหล่อ เมื่อใช้ antipiping powder 17%



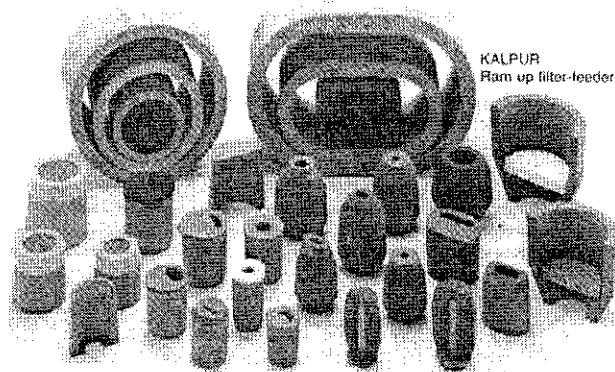
Feeder head				Exothermic material		Shape modulus and weight of the casting (feeding area)						
Dimensions			Volume, weight		Amount, kg	Waiting time, min	Massive, such as cubes, massive cylinder		Bars, plates only with feeding zone		Plates with feeder head + end zone combined with casting	
Ø	b	H	l'	l''			M <sub>c</sub>	G	M <sub>c</sub>	G	M <sub>c</sub>	G
mm	cm	cm	Lit.	kg m. ton		cm	kg m. ton	cm	kg m. ton	cm	kg m. ton	
15	Ø	7	0.9	3.5	1.2	3	2.2	23	2.0	64	1.8	92
15	19.5	8	1.8	11	2.5	4	2.8	49	2.5	130	2.2	190
15	26	10	3.0	18	4.2	6	3.2	82	2.9	220	2.6	320
15	Ø	8	1.35	8.2	4.5	5	2.6	36	2.4	100	2.1	142
15	22.5	9.5	2.8	17	3.5	9	3.2	76	2.9	200	2.6	296
15	30	11	4.7	29	5.0	12	3.6	123	3.3	330	3.0	500
15	Ø	9	2.0	12	2.5	8	2.9	54	2.7	150	2.4	212
15	25.5	11	4.0	27	4.5	12	3.6	110	3.3	300	2.9	425
15	34	13	6.7	46	7.0	15	4.2	180	3.8	480	3.4	710
30	Ø	10	3.2	19	3.5	12	3.5	86	3.2	230	2.8	340
30	30	12.5	6.4	38	7.0	15	4.5	174	3.9	470	3.5	680
30	40	15	11	66	12	19	4.9	300	4.5	820	4.0	1.1
30	Ø	11	4.9	30	5.5	14	4.0	155	3.7	360	3.2	520
30	34.5	14	10	66	10	18	4.8	270	4.4	740	4.0	1.0
30	46	17	17	100	18	22	5.5	460	5.1	1.2	4.6	1.8





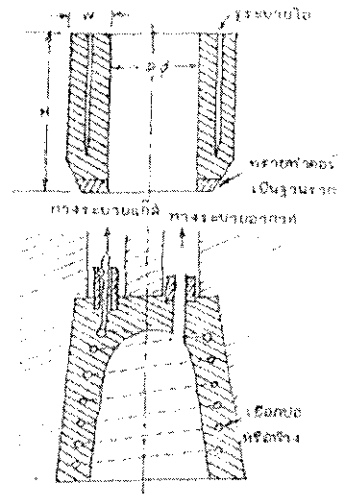
## Exothermic Sleeve

เป็นวิธีที่ให้ความแน่นทนกว่า antipiping powder แต่ก็มีอายุขัยที่ยาวนานกว่าเช่นกัน เริ่มจากต้องนำผง exothermic material มาผสมกับทรายควอร์ตและตัวประสาน ส่วนใหญ่ใช้ Na silicate อัดลงในแบบ แล้วปล่อยแก๊ส  $CO_2$

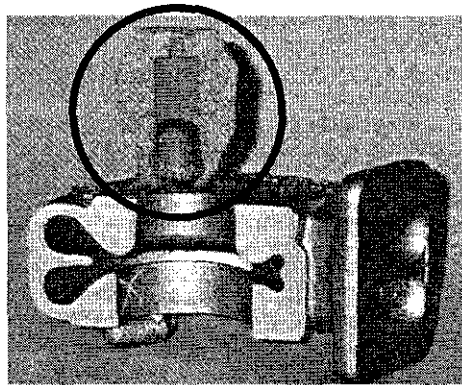


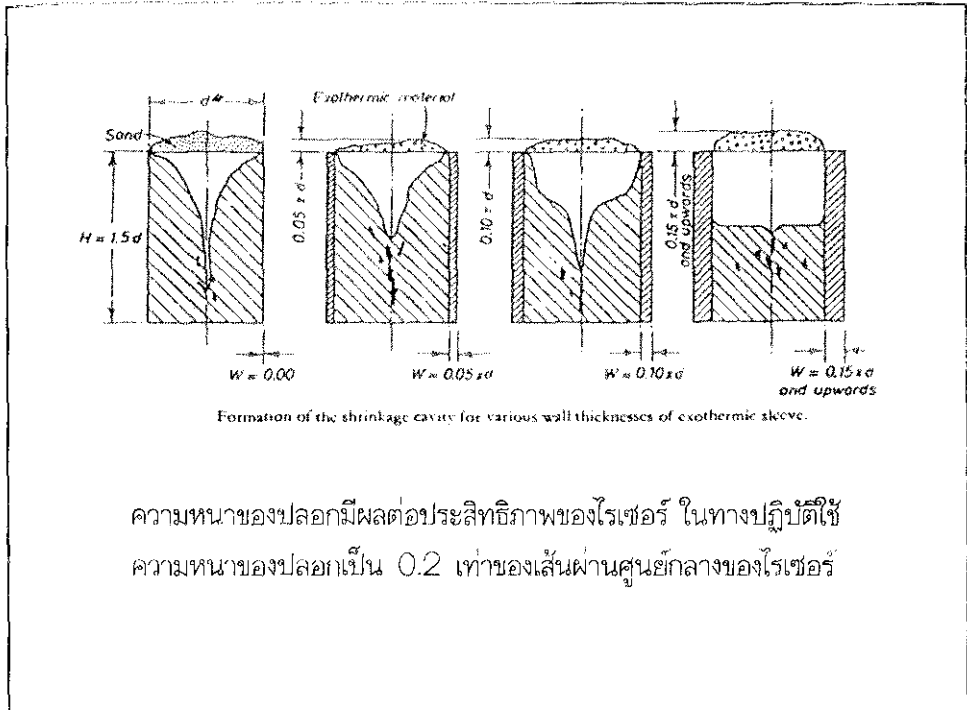
## Exothermic Sleeve

Exothermic sleeve จะต้อง  
มีการระบายไอ เนื่องจากจะเกิด  
แก๊สจำนวนมากจากปฏิกิริยา และ  
เพื่อให้แก๊สเข้าทำปฏิกิริยาได้ดีขึ้น  
จึงต้องมีการเจาะรูที่บริเวณกึ่งกลาง  
ของความหนาของปลอก  
ในกรณีที่เป็น Blind riser จะ  
ใช้เชือกฟางพันรอบปลอกขึ้นไป  
ทางด้านบนดังภาพ

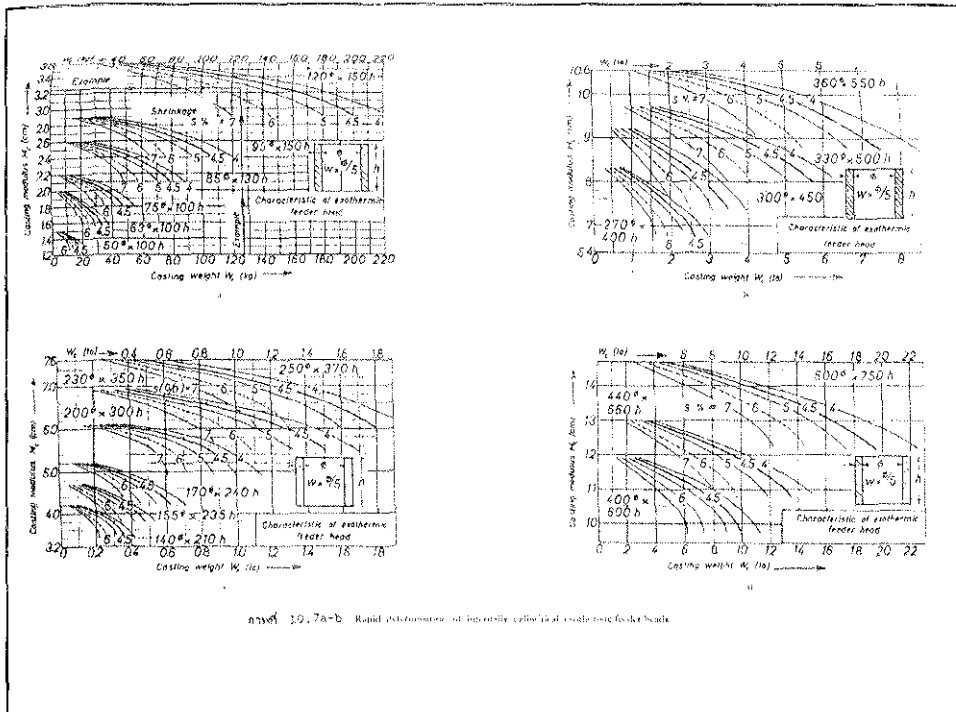


ภายหลังจากทำปลอกเสร็จจะต้องนำไปอบแห้งเพื่อให้ความ  
ต้านทานแรงกระแทกและแรงกดสูงขึ้น  
สามารถนำไปใส่ในแบบทรายตั้งแต่ตอนตำแบบหรือ อาจเว้น  
ช่องว่างไว้แล้วนำมาใส่ก่อนเทน้ำโลหะก็ได้





เส้นผ่าศูนย์กลางภายในโรเซอรั (mm)	ความหนาของปลอกโรเซอรั (mm)
ต่ำกว่า 75	12
100 - 150	20
175 - 225	25
250 - 305	31
330 - 380	37
405 - 455	43
480 - 535	50
560 - 610	56
635 - 685	62
710 - 760	68



### การใช้สองวิธีร่วมกัน

ในทางทฤษฎีแล้วไม่จำเป็นต้องใช้สองวิธีร่วมกัน แต่ในทางปฏิบัติการคำนวณอาจไม่ถูกต้องดังนั้นจึงมีการใช้สองวิธีร่วมกันเพื่อให้ได้ผลที่ดีขึ้น แต่ในกรณีที่เป็น Blind riser จะใช้สองวิธีร่วมกันไม่ได้ต้องคำนวณให้แม่นยำ โดยอาจเพิ่มความหนาของปลอกอีก 10-20% เพื่อความแน่นอน

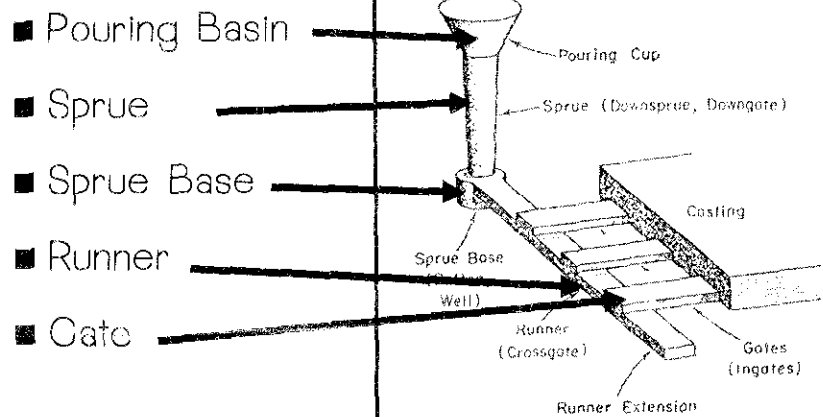
## บทที่ 11 ระบบทางวิ่งของโลหะหลอมเหลว Gating System

### Gating System

- Gating system ทำหน้าที่นำโลหะหลอมเหลวไปยังโพรงแบบระบบทางเดินโลหะหลอมเหลวที่ดีควรจะให้โลหะเหลวไหลไปยังโพรงแบบได้สะดวก มีหลักแนวคิดดังนี้
  - ไม่ควรให้เกิดการไหลแบบ turbulence
  - ไม่ควรให้เกิด erosion และ impingement
  - ทำให้การแข็งตัวเป็นแบบ Directional solidification
  - ควรป้องกันไม่ให้ slag ทราย หรือสารเจือปนติดเข้าไปในโพรงแบบ



## องค์ประกอบของ Gating system

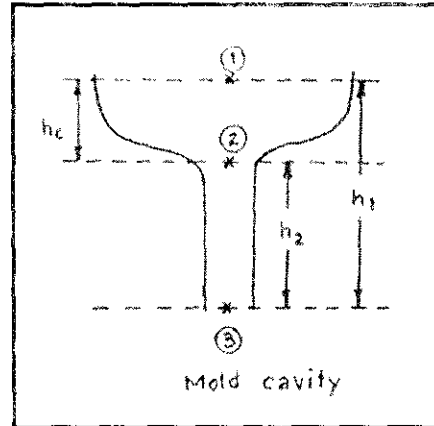


## Pouring Basin

- ควรมีขนาดพอเหมาะ ให้น้ำโลหะเต็มตลอดเวลา
- มีความลึกพอเหมาะ เพื่อให้มีการไหลวนเวียน slag ไม่ถูกดูดลงไปใน sprue
- ควรอยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสมสำหรับการเทน้ำโลหะแต่ละแบบต่อเนื่อง

## Sprue

- ควรเลือกรูปปร่างที่เหมาะสมไม่ทำให้เกิดการดูดวักเอาอากาศเข้าไปในโพรงแบบ
- ถ้านิยมสัญลักษณ์และระนาบดังภาพ



จาก Bernoulli Equation

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2$$

Assumption:

$$V_1 \lll V_3$$

$$P_1 \approx P_3$$

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 = \frac{P_3}{\rho g} + \frac{V_3^2}{2g} + z_3$$

$$\frac{V_3^2}{2g} = h_1$$

$$V_2 A_2 = V_3 A_3$$

$$A_2 = A_3$$

$$\therefore V_2 = V_3 = \sqrt{2gh_1}$$

$$\frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 = \frac{P_3}{\rho g} + \frac{V_3^2}{2g} + z_3$$

$$V_2 = V_3$$

$$z_2 - z_3 = h_2$$

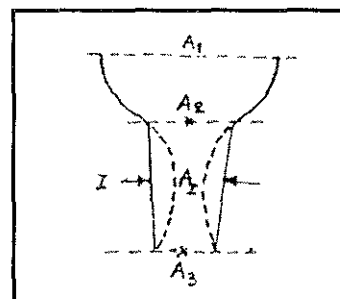
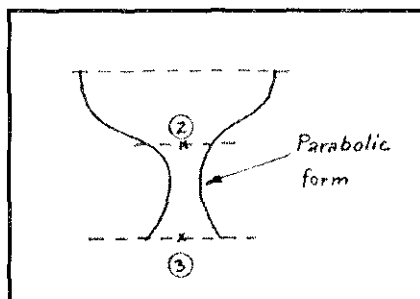
$$P_3 = 1 \text{ atm} = 10000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$$

$$P_2 = 10000 - \rho h_2$$

จะเห็นได้ว่าความดันที่จุด 2 จะต่ำกว่าที่จุด 3 เสมอ ดังนั้นถ้า sprue มีรูปร่างเป็นทรงกระบอกจะมีการดูดอากาศเข้าไปด้วยเสมอ

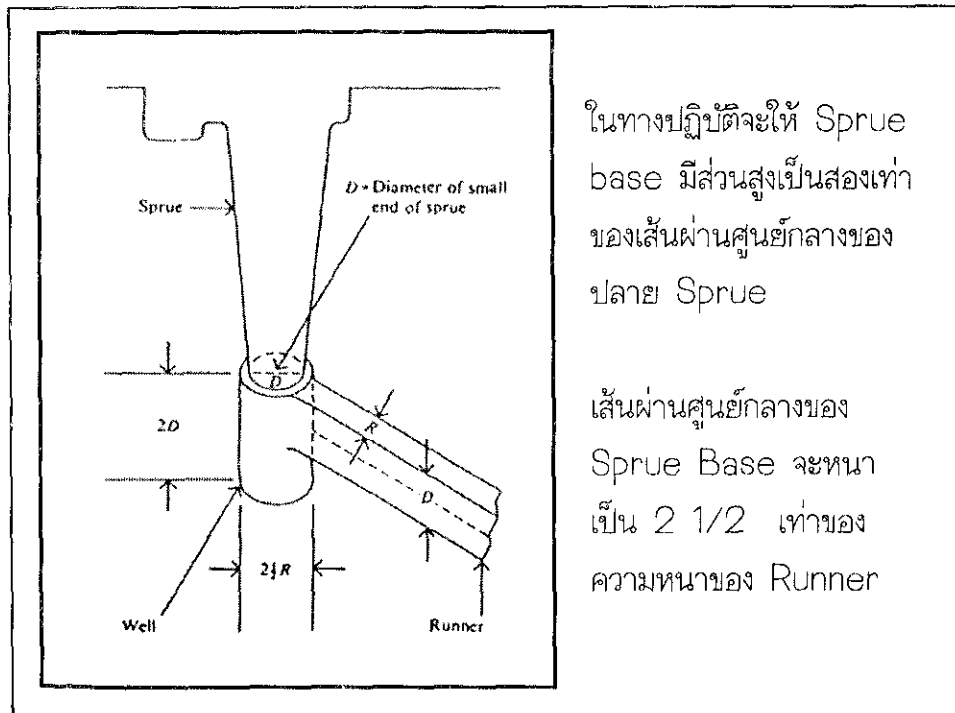
$\frac{P_2}{\rho g} + z_2 = \frac{P_3}{\rho g} + z_3$ $\frac{V_2^2}{2g} + z_2 = \frac{V_3^2}{2g} + z_3$ $A_2 V_2 = A_3 V_3$ $V_2 = \frac{A_3 V_3}{A_2}$ $\frac{A_3}{A_2} = R$ $V_2^2 = R^2 V_3^2$ $\frac{R^2}{2g} V_3^2 - \frac{V_3^2}{2g} = z_3 - z_2$	$V_3 = \sqrt{2gh_1}$ $\frac{R^2}{2g} 2gh_1 - \frac{2gh_1}{2g} = z_3 - z_2 = -(z_3 - z_2)$ $R^2 = \frac{h_1 - h_2}{h_1}$ $R^2 = \frac{h_c}{h_1}$ $R = \sqrt{\frac{h_c}{h_1}}$ $\frac{A_3}{A_2} = \sqrt{\frac{h_c}{h_1}}$
---	---

- ดังนั้นเพื่อให้ความดันคงที่จึงต้องมีการลดพื้นที่หน้าตัดของ Sprue ลงตามระยะทางในแนวตั้งที่เพิ่มขึ้น โดยลดพื้นที่หน้าตัดแบบ Parabolic (สมการกำลังสอง)
- ในทางปฏิบัติไม่สามารถใช้ Sprue แบบ parabolic ได้ จึงใช้ Taper แทน



## Sprue Base

- เป็นส่วนที่ต่อจาก Sprue ทางด้านล่าง
- เป็นที่พักน้ำโลหะก่อนที่จะไหลเข้าสู่ Runner และ Gate ทำให้น้ำโลหะไหลช้าลง
- ทراسย์บริเวณ Sprue Base ควรจะมีความต้านทานการกัดเซาะได้ดีกว่าปกติ อาจทำทراسย์บริเวณนี้ให้แน่นเป็นพิเศษ เนื่องจากไม่ได้ช่วยเรื่อง permeability อยู่แล้ว

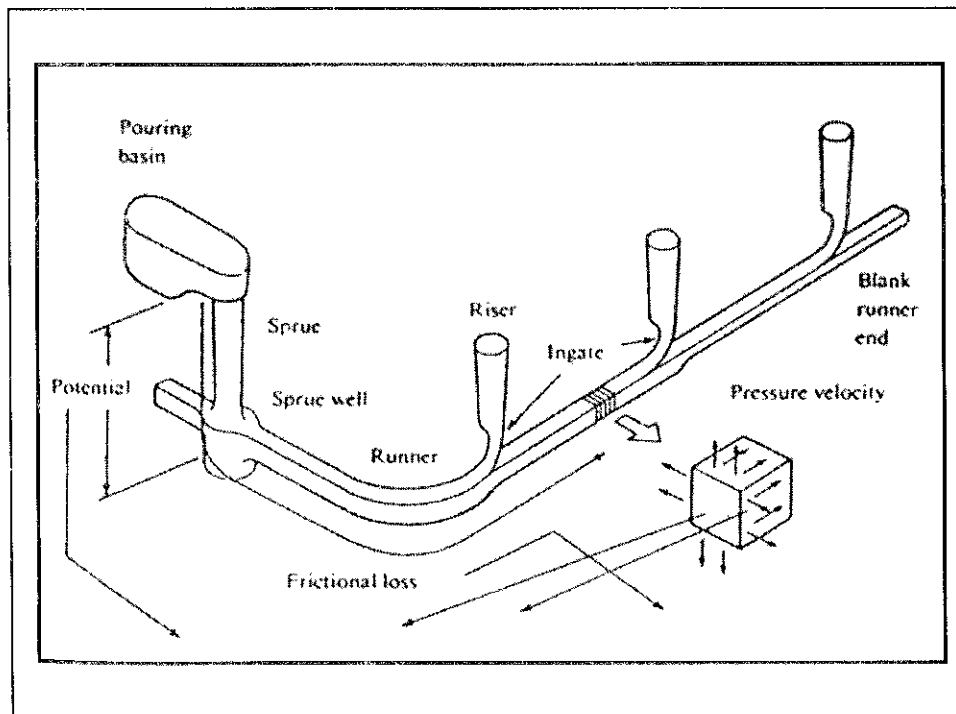


## Gates

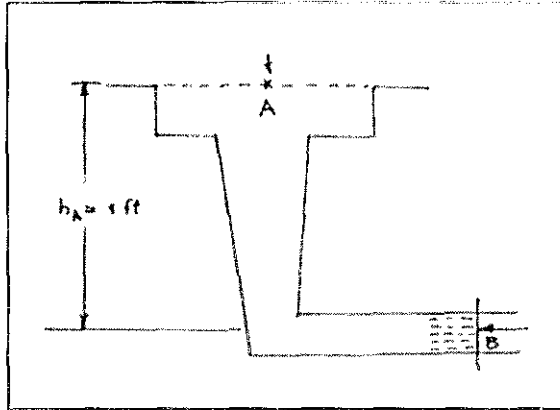
- เป็นส่วนที่น้ำโลหะจะไหลผ่านเข้าไปสู่โพรงแบบ

$$\frac{V_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\rho g} + z_1 = \frac{V_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\rho g} + z_2$$

- อันที่จริงแล้วการไหลผ่าน runner จะต้องมีการเสียพลังงานเนื่องจากความเสียดทานของผนังกับน้ำโลหะ (Frictional force:  $E_f$ )

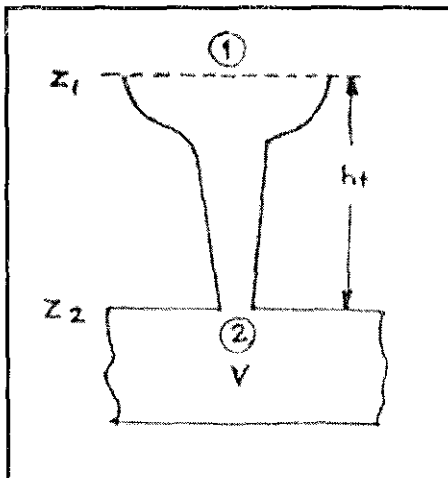


- เพื่อความสะดวกจึงถือว่าค่า frictional force คงที่ (ในทางทฤษฎีไม่ใช่) และตัดออกจากสมการ Bernoulli



$$\begin{aligned}
 P_A &= 1 \text{ atm} = P_B \\
 V_A &= 0 \\
 V_B &=? \\
 h_A &= 1 \text{ ft} \\
 h_B &= 0 \\
 V_B &= \sqrt{2gh_A} = 8 \text{ ft/sec} \\
 Q &= A_B \times V_B = 8 \times 0.01 \\
 &= 0.08 \text{ ft}^3/\text{sec}
 \end{aligned}$$

เวลาที่ใช้ในการเทโลหะหลอมเหลว (Pouring Time)



$$\frac{V_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\rho g} + z_1 = \frac{V_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\rho g} + z_2$$

เมื่อความดันคงที่

$$P_1 = P_2; V_1 = 0$$

$$\frac{V_2^2}{2g} = z_1 - z_2 = h_t$$

$$V_2 = \sqrt{2gh_t}$$

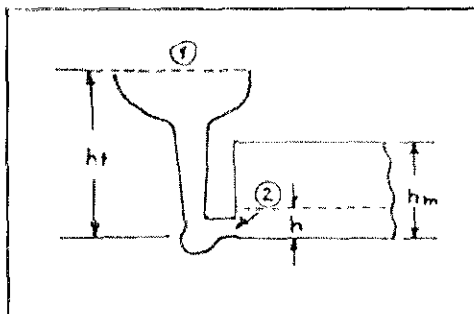
ถ้า Vol เป็นปริมาตรของ Mold cavity เวลาที่ใช้ในการเทโลหะหลอมเหลวจนเต็มแบบคือ

$$t = \frac{Vol}{Q} = \frac{Vol}{A_2 V_2}$$

เมื่อ  $A_2$  คือพื้นที่หน้าตัดที่ปลายสุดของ Sprue

$$t = \frac{Vol}{A_2 V_2} = \frac{Vol}{A_2 \sqrt{2gh_t}}$$

$$= \frac{Vol}{4.43 A_2 \sqrt{h_t}}$$



ถ้าเป็น bottom gate

$$V_2 = \sqrt{2g(h_t - h)}$$

$$t = \frac{Vol}{A_2 V_2}$$

$$dt = -\frac{A_m dh}{A_2 \sqrt{2g(h_t - h)}}$$

$$\int_0^{t_f} dt = -\frac{A_m}{A_2 \sqrt{2g}} \int_0^{h_m} \frac{dh}{\sqrt{h_t - h}}$$

$$t_f = \frac{2A_m}{A_2 \sqrt{2g}} (\sqrt{h_t} - \sqrt{h_t - h_m})$$

$$= 0.452 \frac{A_m}{A_2} (\sqrt{h_t} - \sqrt{h_t - h_m})$$

$h_t$  = ส่วนสูงของ Sprue

$h$  = ส่วนสูงของโลหะหลอมเหลว

$h_m$  = ส่วนสูงของโพรงแบบ

$A_m$  = พื้นที่หน้าตัดของโพรงแบบ

$A_2$  = พื้นที่หน้าตัดของ gate



ตัวอย่าง

Mold cavity รูป cubic สูง 0.1 m พื้นที่หน้าตัดของ gate = 1 cm<sup>2</sup> และค่า  $h_i = 0.1$  m จงคำนวณหา pouring time ทั้งแบบ top gate และ bottom gate

top gate

$$t = \frac{Vol}{A_2 \sqrt{2gh_i}}$$
$$= \frac{(0.1)^3}{(0.0001) \times \sqrt{2g(0.1)}}$$
$$= 7.14 \text{ sec}$$

Bottom gate

$$t_f = \frac{2A_m}{A_2 \sqrt{2g}} (\sqrt{h_i} - \sqrt{h_i - h_m})$$
$$= \frac{2(0.1)^2}{(0.0001) \sqrt{2g}} (\sqrt{0.1} - \sqrt{0})$$
$$= 14.29 \text{ sec}$$

Pouring Time สามารถใช้สูตรของ Heino, Loper, Rosenthal ดังนี้  
 สำหรับเหล็กหล่อสีเทา

$t = k \left( 0.95 + \frac{T}{0.853} \right) \sqrt{W}$	น้ำหนักน้อยกว่า 1000 lbs
$t = k \left( 0.95 + \frac{T}{0.853} \right) \sqrt[3]{W}$	น้ำหนักมากกว่า 1000 lbs

- W คือ น้ำหนัก มีหน่วยเป็น lbs
- k คือ fluidity ทารด้วย 40
- T คือ ความหนาของงานหล่อ

Pouring Time สามารถใช้สูตรของ Heino, Loper, Rosenthal ดังนี้  
 สำหรับเหล็กหล่อเหนียวหล่อด้วย shell mold

$$t = k \sqrt{W}$$

- k มีค่าเท่ากับ 1.8 เมื่อแบบมีส่วนหนาระหว่าง 3/8 - 1 นิ้ว
- มีค่าเท่ากับ 1.4 เมื่อแบบมีส่วนหนา 2 นิ้วขึ้นไป

Pouring Time สามารถใช้สูตรของ Heine, Loper, Rosenthal ดังนี้

สำหรับเหล็กกล้า

$$t = k\sqrt{W}$$

k มีค่าเท่ากับ 1.2 เมื่อชิ้นงานมีน้ำหนัก 100 lbs  
มีค่าเท่ากับ 0.4 เมื่อชิ้นงานมีน้ำหนัก 100,000 lbs

ส่วนงานหล่อที่มีน้ำหนักระหว่างนี้จะใช้การ Interpolate โดยใช้  
แกนน้ำหนักเป็น log scale

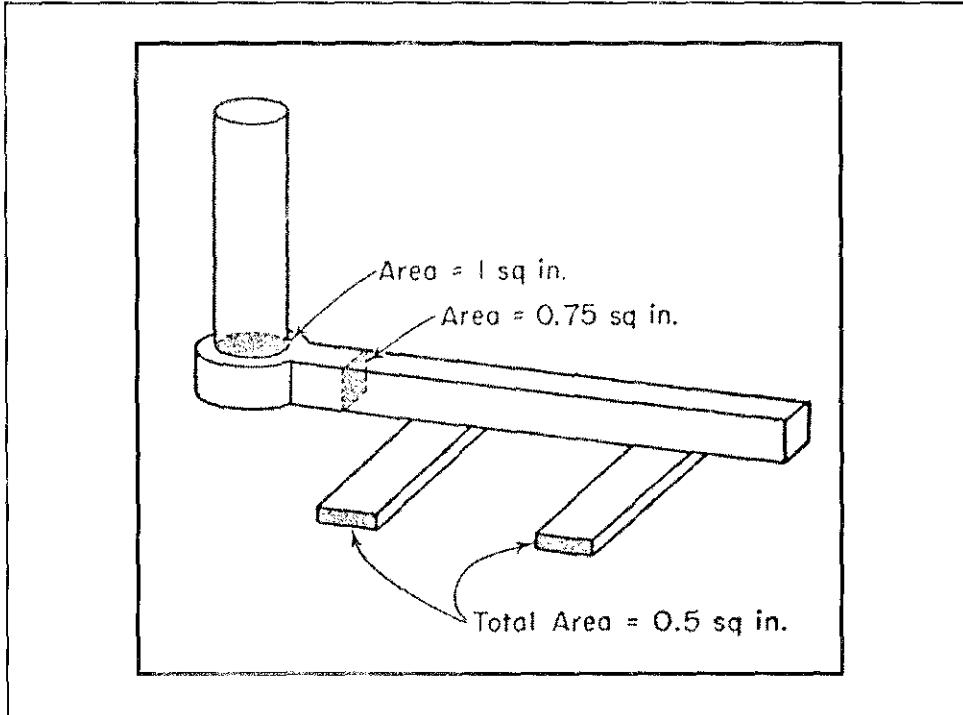
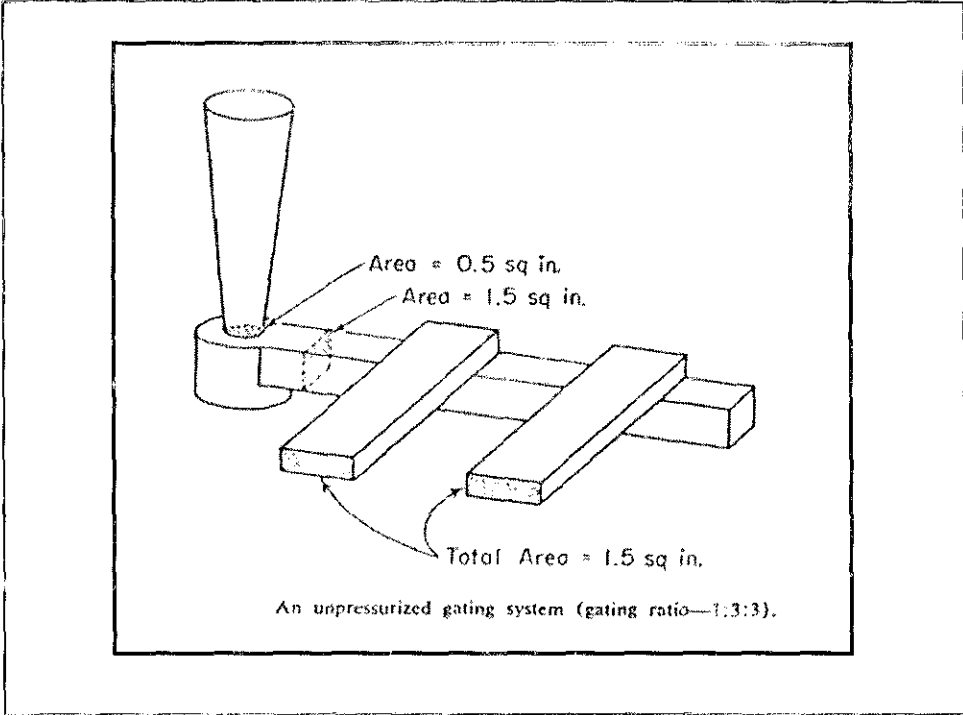
### ระบบทางวิ่งของโลหะหลอมเหลว

#### ■ Unpressurized

มีพื้นที่หน้าตัดของ Sprue เล็กกว่าพื้นที่หน้าตัดของ Runner และ  
Gates ทั้งหมด ส่วนมากจะกำหนดเป็น a:b:c  
(Sprue:Runner:Gates) เช่น 1 : 3 : 3

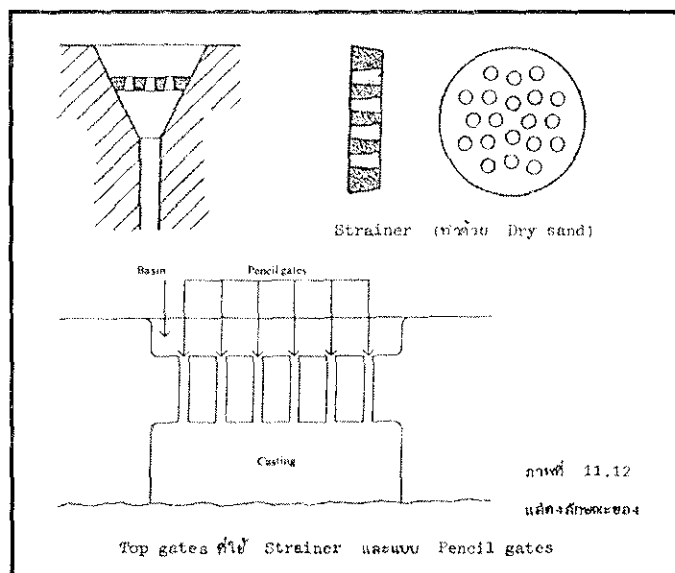
#### ■ Pressurized

มีพื้นที่หน้าตัดของ Sprue โตกว่าพื้นที่หน้าตัดของ Runner และ  
Gates ทั้งหมด เช่น 1 : 0.75 : 0.5



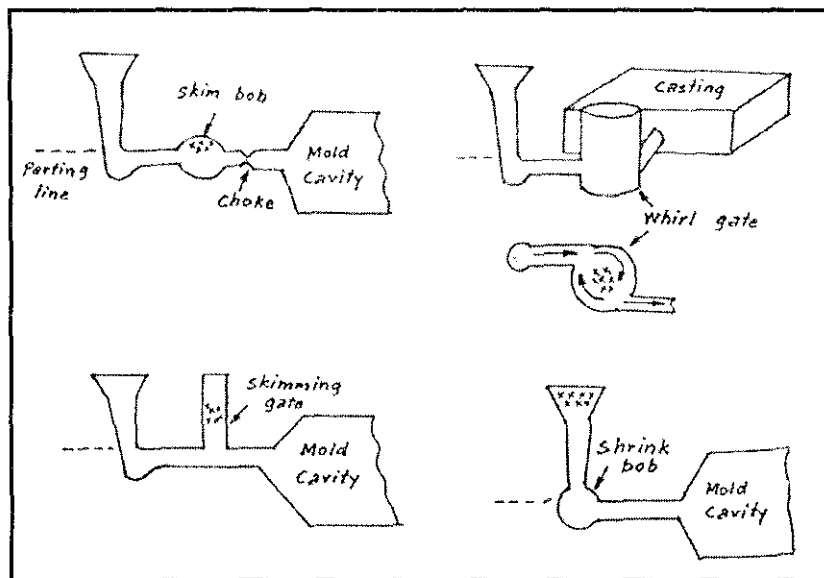
## Top Gating

- บ่อนโลหะหลอมเหลวจากทางด้านบนของโพรงแบบ
- ใช้เวลาในการเทน้อย
- ทำให้เกิด Directional Solidification ได้ง่าย
- ทำให้เกิด erosion ได้ง่าย
- อาจปรับปรุงให้การไหลเป็นระเบียบขึ้นด้วยการใช้ Strainer หรือ Pencil gate



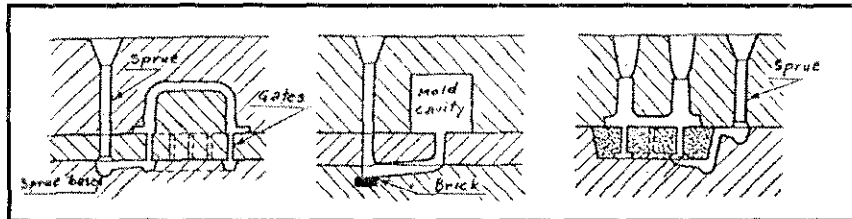
## Parting Line Gating

- บ่อนโลหะหลอมเหลวจากรอยต่อระหว่าง Cope และ Drag
- ใช้เวลาในการเทมากขึ้น
- ทำให้เกิด Directional Solidification ยากกว่า
- สามารถปรับปรุงให้มีจุดดัก slag และทรายได้ โดยการใช้ Skim bob and choke, Whirl gate, Skimming gate, Shrink bob



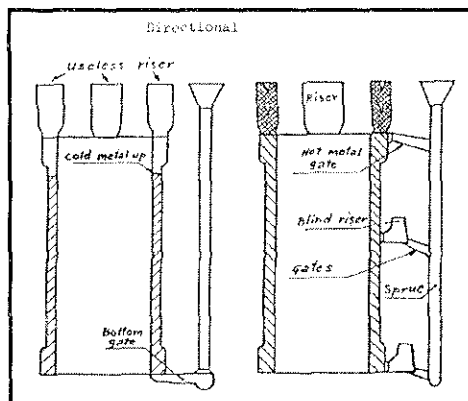
## Bottom Gating

- บ่อนโลหะหลอมเหลวจากด้านล่างของโพรงแบบ โดยให้เอ่อล้น
- ใช้เวลาในการเทมากที่สุด
- ทำให้เกิด Directional Solidification ยากที่สุด
- เกิด turbulence น้อยที่สุด เหมาะสำหรับหล่อโลหะที่เกิด oxidation ได้ง่าย เช่น Al



## Step Gating

- บ่อนโลหะหลอมเหลวจากด้านล่างและด้านข้างของโพรงแบบ โดยมีทางเข้าหลายทางเรียงลำดับกัน
- ช่วยแก้ปัญหาการเกิด Directional Solidification ยากใน bottom gating
- เกิด turbulence น้อย

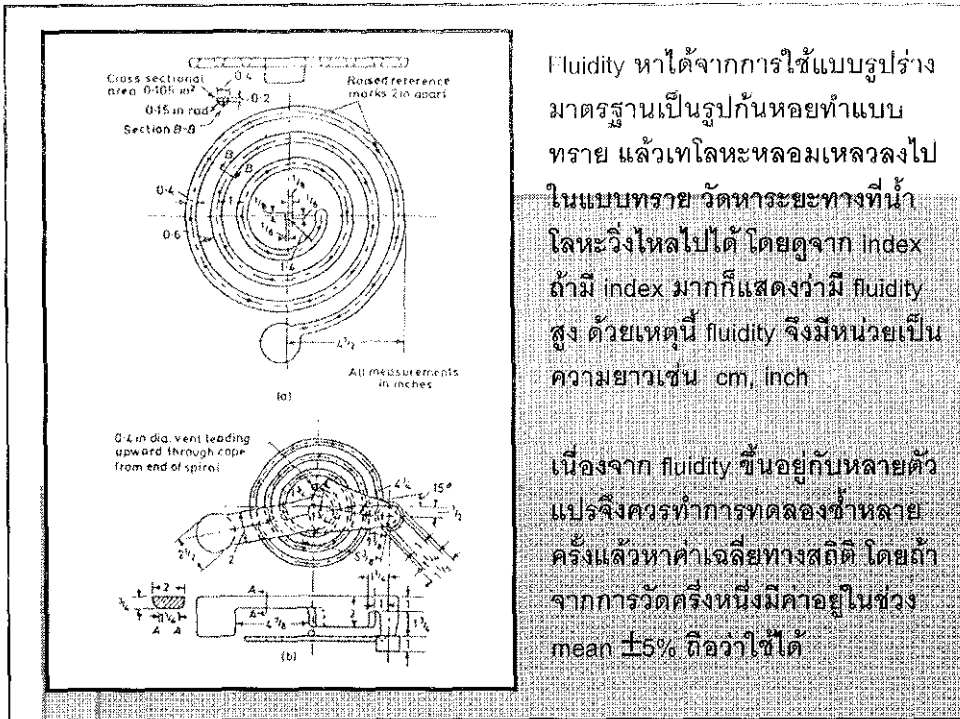


บทที่ 12 ความสามารถในการไหล  
Fluidity

!!! Fluidity ไม่ใช่ Viscosity !!!

Fluidity เป็นความสามารถของโลหะ  
หลอมเหลวที่จะไหลเข้าไปโพรงแบบ  
ซึ่งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิเท, จุดหลอมตัว,  
ความหนืด, ประเภทของทรายแบบ,  
Wetability, ประเภทของโลหะ





Fluidity หาได้จากการใช้แบบรูปร่างมาตรฐานเป็นรูปก้นหอยทำแบบทราย แล้วเทโลหะหลอมเหลวลงไป ในแบบทราย วัดหาระยะทางที่น้ำโลหะวิ่งไหลไปได้ โดยดูจาก index ถ้ามี index มากก็แสดงว่ามี fluidity สูง ด้วยเหตุนี้ fluidity จึงมีหน่วยเป็นความยาวเช่น cm, inch

เนื่องจาก fluidity ขึ้นอยู่กับหลายตัวแปรจึงควรทำการทดลองซ้ำหลายครั้งแล้วหาค่าเฉลี่ยทางสถิติ โดยถ้าจากการวัดครั้งหนึ่งมีค่าอยู่ในช่วง mean  $\pm 5\%$  ถือว่าใช้ได้

### ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อ Fluidity

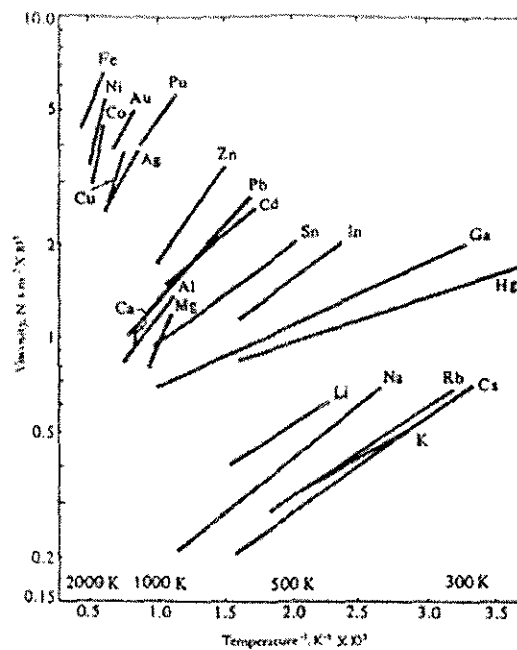
- Viscosity
- Heat Capacity
- Wetability
- Solidification rate
- Molding Sand Properties

## Viscosity

- Fluidity แปรผกผันกับ viscosity ซึ่งมีหน่วยเป็น  $\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$

$$\tau_{yx} = \eta \frac{dv_x}{dy}$$

- เหล็กและอะลูมิเนียมเมื่อมี Si ผสมอยู่จะมีความหนืดลดลงมาก ในทางกลับกันถ้ามี Oxide, Nitride, Carbide ปนอยู่ในโลหะหลอมเหลวจะทำให้มีความหนืดเพิ่มขึ้น



## Heat Capacity

- เมื่อโลหะหลอมเหลวสัมผัสกับผนังแบบหล่อจะมีการถ่ายเทความร้อนจะโลหะหลอมเหลวไปยังแบบหล่อ
- ถ้าโลหะหลอมเหลวมี Heat Capacity ต่ำจะทำให้อุณหภูมิลดลงอย่างรวดเร็วและเกิดการแข็งตัว ทำให้

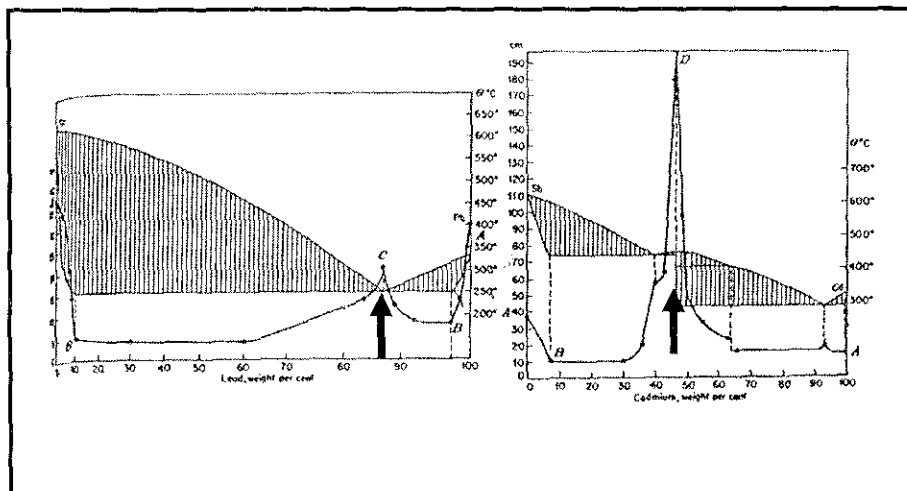
Fluidity ต่ำ

## Wetability

- เป็นผลมาจาก Surface tension ของโลหะหลอมเหลวกับผนังแบบหล่อ
- ถ้าโลหะหลอมเหลวมี Wetability กับแบบหล่อสูง จะทำให้การไหลผ่านผนังแบบหล่อยากขึ้น ถ้ามี Wetability ต่ำจะทำให้ไหลผ่านผนังแบบหล่อได้ง่ายเหมือนหยดน้ำบนใบบอน
- การใช้ Facing sand ซึ่งมี Wetability ต่ำจะทำให้ Fluidity สูงและได้ชิ้นงานที่มีผิวพรรณสวยงาม

## Solidification rate

- ถ้ามีการเกิดผลึกขึ้นโลหะหลอมเหลวจะทำให้โลหะหลอมเหลวข้นและหนืดขึ้น ทำให้ Fluidity ต่ำ
- ดังนั้นที่ Eutectic composition จะต้องมี Solidification rate ต่ำกว่าส่วนผสมอื่นเนื่องจากไม่มีการเกิด Primary Phase ขึ้นมาก่อน และจะมี Fluidity สูง ดังนั้น Al-11.7%Si จึงสามารถหล่อได้ง่าย
- Intermetallic compound ที่มีรูปแบบการแข็งตัวแบบ Congruent เช่นกันจึงมี Fluidity สูง



## Molding Sand Properties

- สมบัติของทรายแบบหล่อก็มีผลต่อ Fluidity เช่น
  - Heat Conductivity
  - Heat Capacity
  - Fineness
  - Permeability

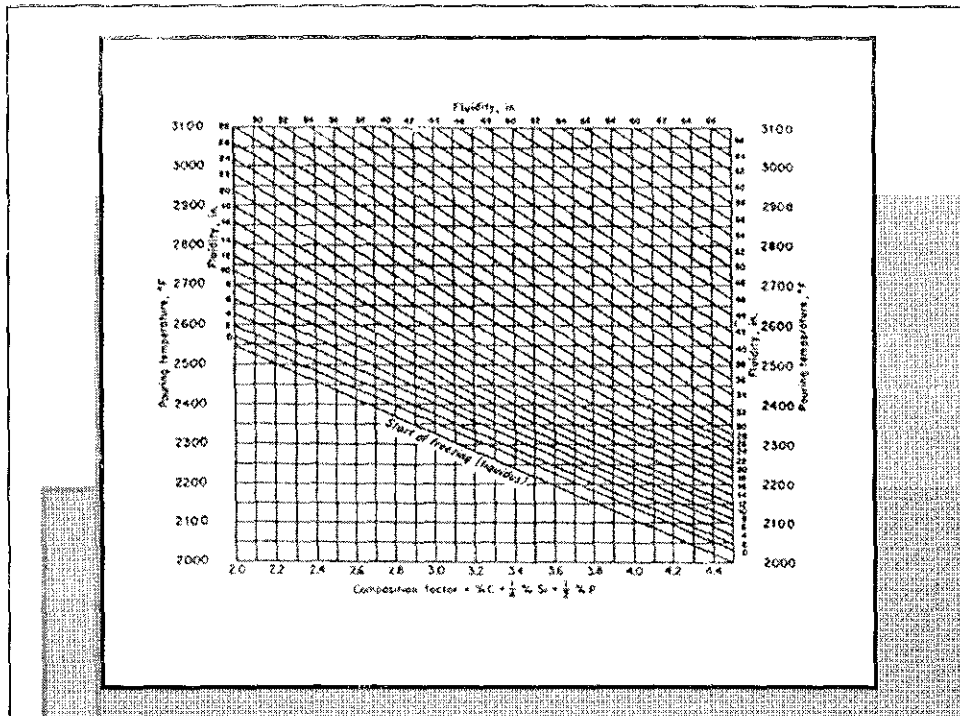
## Fluidity ของเหล็กหล่อ

- เหล็กหล่อสีเทาเป็นเหล็กหล่อที่มี Fluidity สูง โดยขึ้นอยู่กับส่วนผสมทางเคมีเป็นหลัก อัตราผสมที่มีอิทธิพลได้แก่ %C, %Si และ %P ดังนั้นจึงต้องพิจารณาผลของธาตุเหล่านี้รวมกันด้วย Composition Factor

$$C.F. = \%C + \frac{1}{4}\%Si + \frac{1}{2}\%P$$

- จากค่า C.F. นำมาหาค่า Fluidity ที่อุณหภูมิ T (°F) ได้จากสูตร

$$Fluidity(in) = 14.9 \times C.F. + 0.05T - 155$$



- ที่อุณหภูมิเทสูง Fluidity จะสูง
- ที่ส่วนผสมใกล้เคียง Eutectic เท่าไหร่ Fluidity จะยิ่งสูง
- สำหรับ Hypereutectic grey cast iron จะเกิด Kish graphite ขึ้นก่อนปฏิกิริยา Eutectic ซึ่งทำให้ Fluidity ต่ำลงเช่นกัน
- สำหรับเหล็กหล่อขาว การใช้อะลูมิเนียมเป็นตัวไล่แก๊ส จะทำให้ Fluidity ต่ำลง เนื่องจากเกิด Oxide ของ Al ที่ผิวของเหล็กหลอมเหลว

## Fluidity ของเหล็กกล้าผสม

- เหล็กกล้ามีจุดหลอมตัวสูงทำให้ทดสอบ Fluidity ได้ยากจึงมีการเปลี่ยนจาก Spiral fluidity test เป็นแบบทางตรง
- การกำจัดแก๊สด้วย Al จะทำให้ Fluidity ต่ำลง เนื่องจากเกิด Oxide film ที่ผิวของโลหะหลอมเหลว
- การเติม Si 0.5% ช่วยเพิ่ม Fluidity ของเหล็กกล้าหล่อ
- Mn ไม่เกิน 12 – 14% จะช่วยเพิ่ม Fluidity แต่มากกว่า 12 – 14% แล้ว Fluidity จะคงที่

## บทที่ 13 Casting Defect

### ประเภทของ Casting Defect

- Metallic Projection
- Cavities
- Discontinuities
- Defective Surface
- Incomplete Casting
- Incorrect Dimension and Shape
- Inclusion or Structural Anomalies



# Metallic Projection

เป็น defect ที่สามารถมองเห็นได้ด้วยตา เกิดขึ้นที่พื้นผิวของชิ้นงานโลหะ

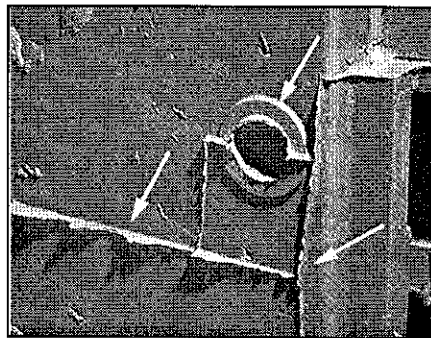
## Fin, Flash

### ■ สาเหตุ

- Clearance ระหว่างแม่ หรือระหว่างแม่กับได้แม่ไม่ดี

### ■ วิธีแก้ไข

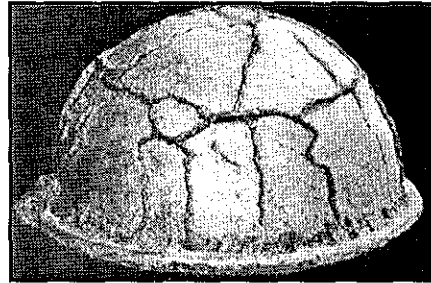
- ปรับปรุงการดูแลรักษาแม่จำลอง
- ควบคุมขนาดแม่จำลอง
- ระวังในการติดตั้งได้แม่
- ที่รอยต่อระหว่างแม่หรือได้แม่ถ้าจำเป็น



## Veining

### ■ สาเหตุ

- เเผแบบเร็วเกินไป ปริมาณ binder มากเกินไป เเผที่อุณหภูมิสูงเกินไป
- ผนังแบบแตกจากแรงดันน้ำโลหะมากเกินไป



### ■ วิธีแก้ไข

- ปรับส่วนผสมทรายให้เหมาะสม
- ลดขนาดและส่วนสูงของ Sprue, Riser

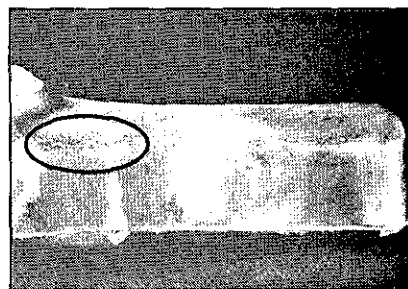
## Heat Checked Mold

### ■ สาเหตุ

- เเผแบบซ้ำไปมาหลายครั้ง
- แม่พิมพ์ได้รับ Thermal fatigue มากเกินไป

### ■ วิธีแก้ไข

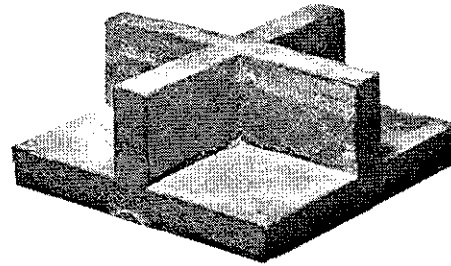
- เลือกวัสดุที่ต้านทาน Thermal fatigue
- อบเพื่อคลายความเค้นหลังจากใช้งานไปช่วงหนึ่ง
- ไม่ควรเเผแบบทรายหลายครั้งเกินไป



## Fillet Scab

### ■ สาเหตุ

เผาแบบไม่ทั่วถึง หรือ แบบได้รับ  
ความชื้นอีกครั้งหลังเผาแบบ  
ทรายแบบจึงรับน้ำหนักตัวเอง  
ไม่ได้ มักเกิดที่ Cope



### ■ วิธีแก้ไข

- เผาแบบอย่างทั่วถึง
- ใช้ Special Additive เช่น Sea coal เพิ่มความแข็งแรง
- ใช้ตะปูฝังเสริมแรงที่ Cope

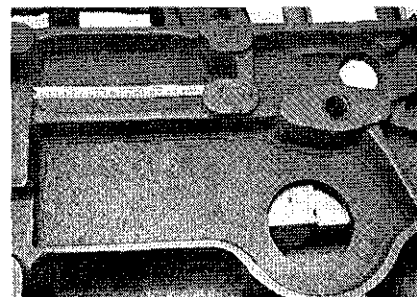
## Fillet Vein

### ■ สาเหตุ

- เกิดรอยแตกที่มุมของแบบขณะ  
เผาแบบ เนื่องจากมี binder  
มากเกินไป

### ■ วิธีแก้ไข

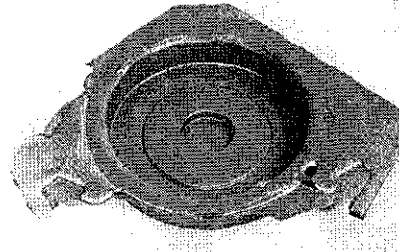
- ลดปริมาณ Binder
- เปลี่ยนประเภท Binder



## Cope Raise, Raise Mold

### ■ สาเหตุ

- แรงดันของน้ำโลหะมากเกินไป ยก Cope ให้ลอยขึ้น ขณะที่โลหะยังไม่แข็งตัว มิติของชิ้นงานจะเสียไป ไม่สามารถแก้ไขได้ด้วยการตัดหรือตีหักออก



### ■ วิธีแก้ไข

- ใช้น้ำหนักถ่วงที่ Cope
- ลดส่วนสูงของ Sprue และ Riser

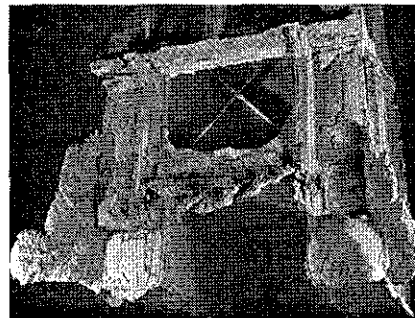
## Sag, Strain

### ■ สาเหตุ

แรงดันของน้ำโลหะมากเกินไปทำให้ทรายบริเวณที่อ่อนแอแตกออก มักเกิดบริเวณ Drag

### ■ วิธีแก้ไข

- ดำทรายให้มีความแข็งแรงมากพอและสม่ำเสมอ
- ออกแบบ Parting-line ของแบบจำลองไปตามด้านยาวของชิ้นงาน
- ลดส่วนสูงของ Sprue
- เปลี่ยนหรือเพิ่มปริมาณ Binder



## Broken Mold

### ■ สาเหตุ

- เกิดกับ Investment Casting
- แบบแตกขณะ dewax, รับแรงจากน้ำโลหะ

### ■ วิธีแก้ไข

- เปลี่ยนประเภท investment
- เพิ่มจำนวนการ dip เพื่อเพิ่มความหนาของ investment



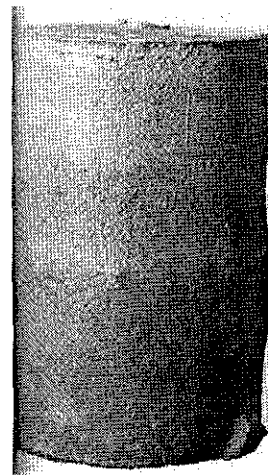
## Swell

### ■ สาเหตุ

- ด้าทรายไม่แน่นพอ
- เคาแบบไม่ทั่วถึง
- แรงดันน้ำโลหะมากเกินไป

### ■ วิธีแก้ไข

- ด้าแบบด้วยแรงมากขึ้นอย่างสม่ำเสมอ
- ใช้ binder ที่มีความแข็งแรงมากขึ้น



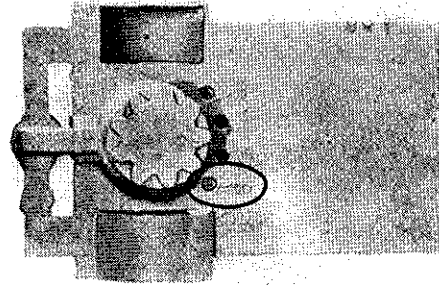
## Erosion, Wash

### ■ สาเหตุ

- ทราয়ถูกน้ำไหลกัดเซาะ เนื่องจากมีความแข็งแรงไม่พอ
- เสาแบบไม่ทั่วถึง
- ทางเดินน้ำไหลไม่ดี

### ■ วิธีแก้ไข

- ออกแบบทางเดินน้ำไหลให้เหมาะสม
- ต้ําแบบด้วยแรงที่มากขึ้น  
เปลี่ยนประเภทหรือปริมาณของ Binder
- ใช้เซรามิกหรือเสริมแรงบริเวณที่เสี่ยงต่อการกัดเซาะ



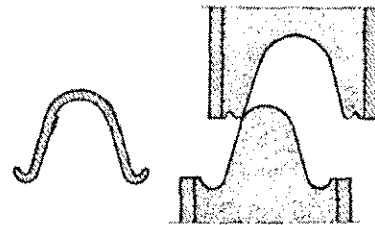
## Crush

### ■ สาเหตุ

- เกิดการกระทบขณะประกอบแบบ

### ■ วิธีแก้ไข

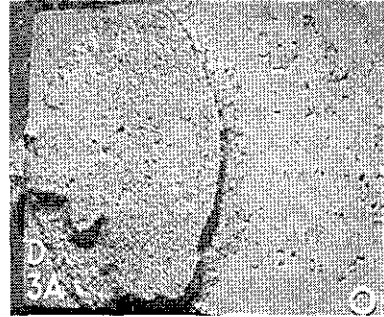
- ระมัดระวัง



## Sticker

### ■ สาเหตุ

- เกิดการแยกชั้นของ Facing Sand และ Backup sand ขณะถอด Pattern, กระทบแบบ, ระหว่างเคลื่อนย้าย



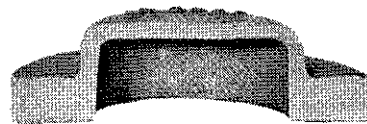
### ■ วิธีแก้ไข

- เพิ่มปริมาณ binder
- ระวังการใช้ทรายที่มีสมบัติต่างกันมาก
- ต่ำทรายด้วยแรงที่สม่ำเสมอ
- ใช้ตะปูยึดเสริมความแข็งแรง

## Raised Core

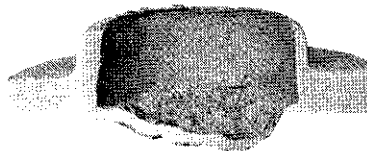
### ■ สาเหตุ

- ใต้แบบแตก เนื่องจากมีความแข็งแรงไม่พอ
- แรงดันของน้ำโลหะที่ปะทะใต้แบบมากเกินไป
- แตะระหว่างการเผาแบบที่อุณหภูมิสูงเกินไป



### ■ วิธีแก้ไข

- ระวังการถอด Pattern
- เพิ่มปริมาณ binder
- ออกแบบทางเดินน้ำโลหะเลี่ยงการปะทะ
- ใช้ตะปูเสริมแรง
- ลดอุณหภูมิเผาแบบ



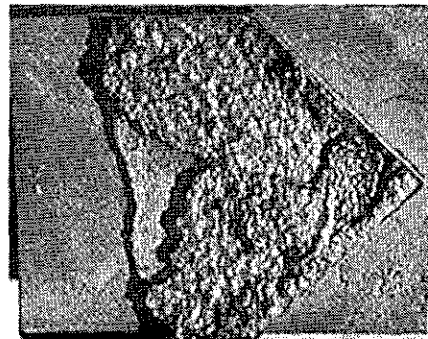
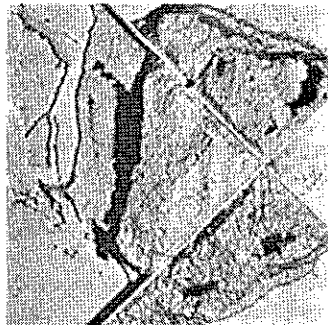
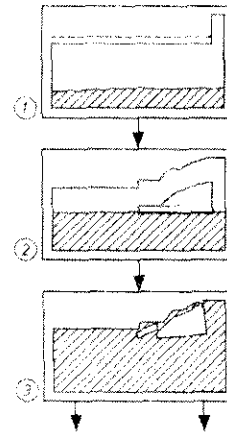
## Corner Scab

### ■ สาเหตุ

- ทราจแบบมีความแข็งแรงต่ำ
- ทราจแบบมีความหนาแน่นไม่สม่ำเสมอ

### ■ วิธีแก้ไข

- เพิ่มปริมาณ binder
- เอาใจใส่การผสมทราจ อย่างสม่ำเสมอขณะทราจยังร้อน
- ต่ำทราจด้วยแรงสม่ำเสมอ





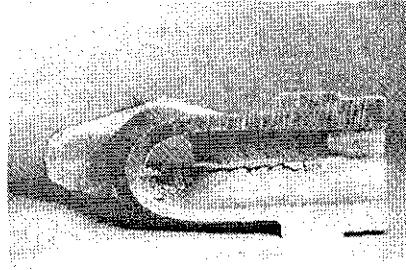
## Broken Core

### ■ สาเหตุ

- ไล่แบบมีความแข็งแรงต่ำ
- แรงดันน้ำโลหะมากเกินไป
- ไล่แบบแตกขณะปิดแบบ เนื่องจากมี clearance น้อยเกินไป
- แรงปะทะของน้ำโลหะมากเกินไป

### ■ วิธีแก้ไข

- เพิ่มปริมาณ binder
- ลดส่วนสูงของ Sprue
- ดูขนาดของแบบจำลอง
- ออกแบบทางเดินน้ำโลหะให้ลดแรงปะทะ



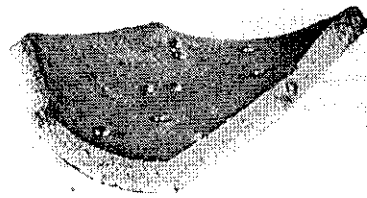
## Sweating

### ■ สาเหตุ

- น้ำโลหะที่แข็งตัวสุดท้ายหลุดออกมาที่ผิวชิ้นงาน เนื่องจากมีแรงดันภายในมากจากการหดตัว หรือ เกิด graphite
- น้ำโลหะดูดซับปริมาณแก๊สมากเกินไป
- มักเกิดที่ผิวบริเวณที่เป็นมุมอับ

### ■ วิธีแก้ไข

- ใช้ Fluxing material ปกคลุมผิวน้ำโลหะ ป้องกันการดูดซับแก๊ส
- เพิ่มความแข็งแรงทราย

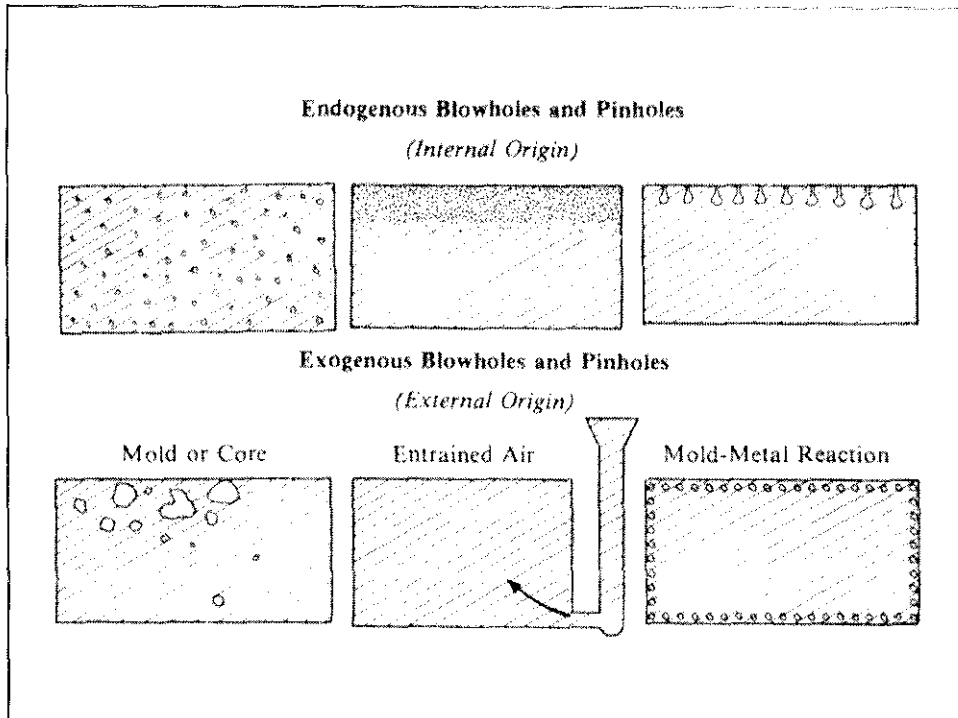


# Cavities

ปรากฏเป็นโพรง ช่อง รู ร่อง ลึกลงไปในชิ้นงาน อาจมองเห็นจากผิวนอกหรือไม่ก็ได้

## Cavities

- สาเหตุของ cavities มีสองสาเหตุหลักคือ
  - Gas
  - Shrinkage
- สำหรับ cavities ที่เกิดจากแก๊ส มีแหล่งที่มาของแก๊สได้แก่
  - Endogenous มีแหล่งที่มาจากภายในโลหะหลอมเหลว
  - Exogenous มีแหล่งที่มาจากภายนอกโลหะหลอมเหลว เช่น ทรายแบบ ปฏิกริยาเคมีกับสิ่งแปลกปลอม การดูดวักอากาศ



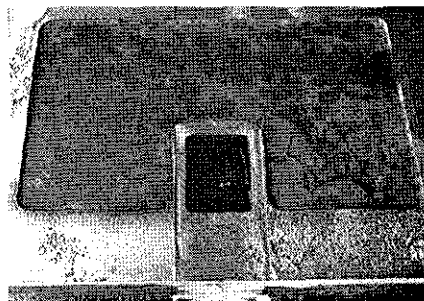
## Blow hole, Pin hole

■ สาเหตุ

- การเจาะรูไม่ดี หรือไม่เพียงพอ ทRAYดูดตันรูไอ
- น้ำโลหะดูดซับปริมาณแก๊สมากเกินไป
- การดูดรั่วอากาศจากภายนอก เนื่องจากการออกแบบทางวิ่งน้ำโลหะไม่ดี

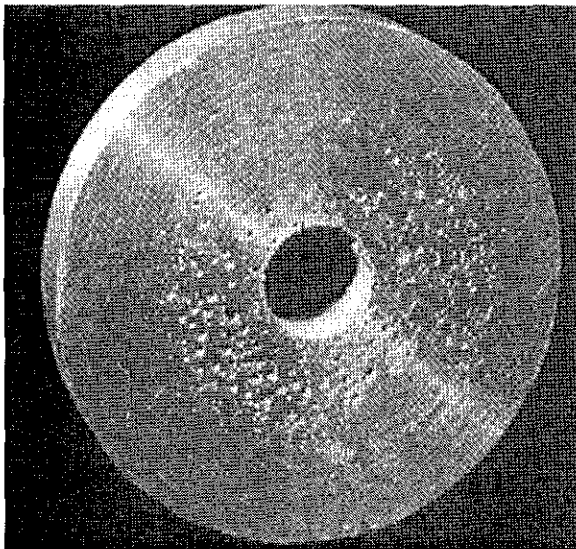
■ วิธีแก้ไข

- แก้ไขตามแต่สาเหตุ และแหล่งที่มาของแก๊ส



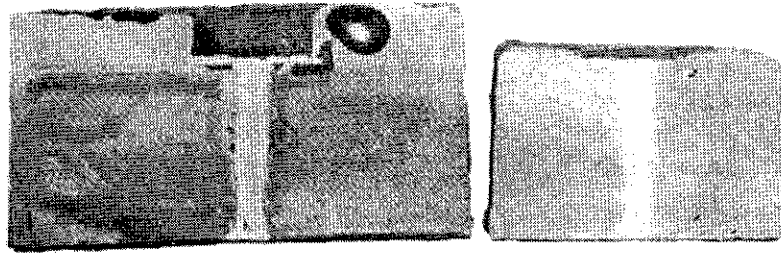
## วิธีการสังเกตเพื่อทราบแหล่งที่มาของแก๊ส

- Endogenous blow hole มักจะมีขนาดสม่ำเสมอ กระจายทั่วไปทั้งชิ้นงาน ในขณะที่ exogenous blow hole โฟรงจะมีขนาดใหญ่เล็กไม่สม่ำเสมอและปรากฏบ่อยเป็นบางบริเวณ
- ฐานส่วนใหญ่ส่วนใหญ่เป็น exogenous blow hole
- สำหรับเหล็ก รูที่เกิดจากการดูดอากาศจะมีผิวสีเทา รูจากแก๊ส  $\text{CO}_2$  จะมีผิวสีอมน้ำเงิน รูจากแก๊ส  $\text{H}_2$  จะมีผิวใสสะท้อนแสง



ชิ้นส่วนโลหะผสม  
ทองแดงมีการดูดซับ  
แก๊สมากเกินไป เป็น  
endogenous blow  
hole

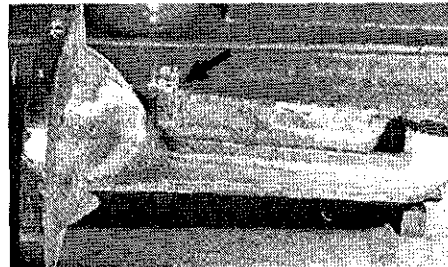
## Blow hole, Pin hole at adjacent to chill, chaplet



- สาเหตุ
  - มีการควบคุมของน้ำที่ chill หรือ chaplet
  - Chill หรือ chaplet เป็นสนิม
  - มีน้ำมันหรือสารเคลือบที่กลายเป็นไอที่ chill หรือ chaplet
- วิธีแก้ไข
  - ล้างแบบก่อนเทน้ำโลหะ
  - ทำจี้ดสนิมก่อนใช้งาน

## Slag Blowhole

- สาเหตุ
  - เกิดปฏิกิริยาระหว่าง C ในโลหะหลอมเหลวกับ Oxide ใน slag ทำให้เกิด gas พบรูพูนที่บริเวณรอบ slag
- วิธีแก้ไข
  - ใช้ Fluxing material ทำจี้ด slag
  - กวาด slag ให้หมด
  - ใช้ gating system ที่มีการดัก slag
  - ลดการไหลแบบ turbulence



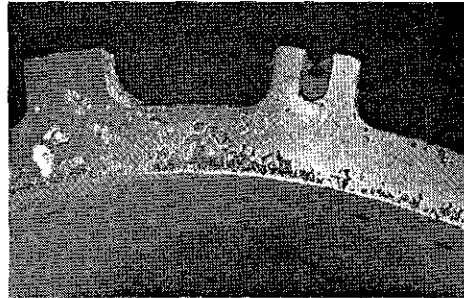
## Subsurface Blowhole

### ■ สาเหตุ

- ทรายแบบหรือไส้แบบมี Permeability ต่ำ
- อุณหภูมิเตต่ำ
- ในกรณีของ Die casting อาจเกิดจากการกลายเป็นไอของสารหล่อลื่น

### ■ วิธีแก้ไข

- เพิ่ม Permeability
- เพิ่มอุณหภูมิเต
- สำหรับ Die casting ลดปริมาณสารหล่อลื่น และอุณหภูมิ



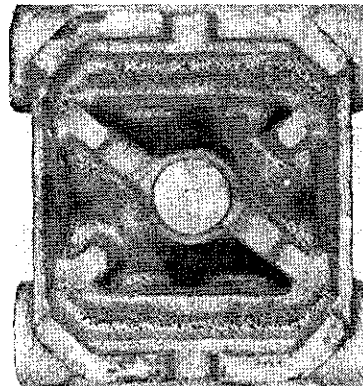
## Corner Blowhole

### ■ สาเหตุ

- ความชื้นในทรายแบบที่ร้อนบริเวณมุมกลายเป็นไอมีแรงดันสูง ดันเข้าไปในโลหะหลอมเหลว

### ■ วิธีแก้ไข

- เพิ่ม Permeability
- ลดส่วนที่เป็นแฉงมุม ให้เป็นส่วนโค้ง
- เพิ่มส่วนสูงของ Sprue เพิ่มแรงดันของน้ำโลหะ
- ใช้ External Chill บริเวณมุม



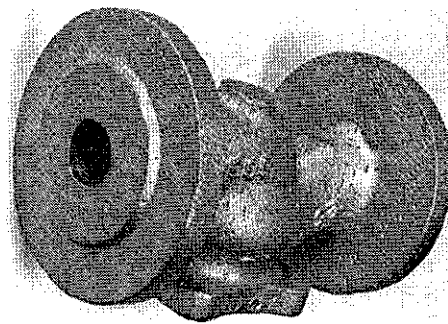
## Surface Blowhole

### ■ สาเหตุ

- โลหะหลอมเหลวมีการดูดซับ gas มากเกินไป
- เกิด gas จาก binder บางชนิด เช่น furan resin

### ■ วิธีแก้ไข

- เพิ่ม Permeability ของทรายแบบ
- ใช้ Fluxing Material และไล่ gas ออกจากโลหะหลอมเหลว
- หลีกเลี่ยงการใช้ binder ที่ทำให้เกิด gas



## วิธีการแยกแยะระหว่าง Blowhole กับ Shrinkage

- Blowhole โฟรงมักจะมีลักษณะกลม อาจมีผิวเรียบใส
- Shrinkage ภายในโฟรงจะมีลักษณะ Dendritic structure ผิวดำด้าน



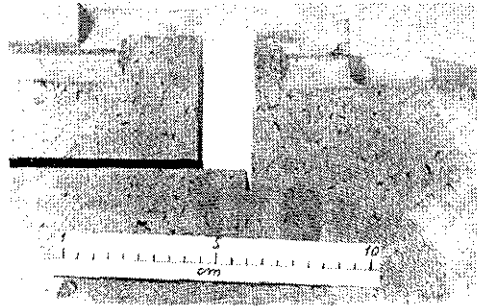
## Disperse Shrinkage

### ■ สาเหตุ

- โลหะหลอมเหลว gas Nitrogen มากเกินไป (ประมาณ 100 ppm)
- ส่วนใหญ่เกิดกับ Electric arc furnace

### ■ วิธีแก้ไข

- ลดปริมาณ Nitrogen ให้ไม่เกิน 40-80 ppm
- เปลี่ยนไปใช้เตา cupola, induction แทน electric arc furnace
- ใช้ Ti และ Al ทำให้เกิด Nitride



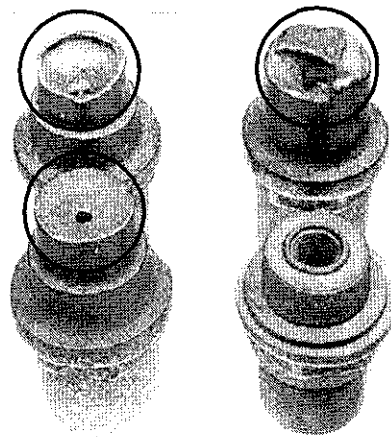
## External Shrinkage

### ■ สาเหตุ

- โลหะหลอมเหลวเกิดการหดตัวเมื่อเปลี่ยนเป็นของแข็ง

### ■ วิธีแก้ไข

- เพิ่มขนาด Riser
- ใช้ Exothermic Sleeve หรือ antipiping powder
- ระวังอย่าให้ด้านบนของ Riser เกิดฟิล์มของแข็งทำให้เกิดสุญญากาศ





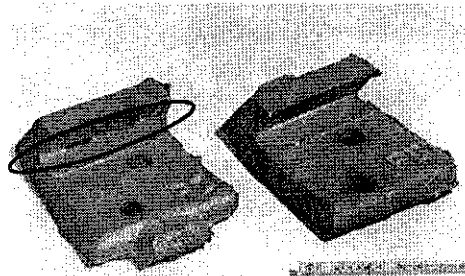
## Corner Shrinkage

### ■ สาเหตุ

- โลหะหดอมเหลวเกิดการหดตัวเมื่อเปลี่ยนเป็นของแข็ง
- บริเวณมุมเป็นจุดสุดท้ายของการแข็งตัว

### ■ วิธีแก้ไข

- เพิ่มขนาด Riser
- ใช้ Exothermic Sleeve หรือ antipiping powder
- ระวังอย่าให้ด้านบนของ Riser เกิดฟิล์มของแข็งทำให้เกิดสุญญากาศ
- ทำให้การแข็งเป็นแบบ Directional Solidification



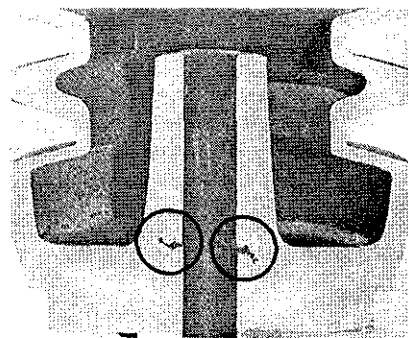
## Core Shrinkage

### ■ สาเหตุ

- โลหะหดอมเหลวเกิดการหดตัวเมื่อเปลี่ยนเป็นของแข็ง
- บริเวณรอบ Core มีอุณหภูมิสูงเป็นจุดสุดท้ายของการแข็งตัว

### ■ วิธีแก้ไข

- ทำให้การแข็งตัวเป็นแบบ Directional Solidification
- ลดการใช้ Core โดยใช้การเจาะรูแทนในส่วนที่บาง



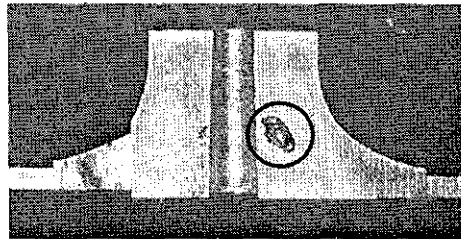
## Internal Shrinkage

### ■ สาเหตุ

- โลหะหลอมเหลวเกิดการหดตัวเมื่อเปลี่ยนเป็นของแข็ง

### ■ วิธีแก้ไข

- เพิ่มขนาด Riser
- ใช้ Exothermic Sleeve หรือ antipiping powder
- ระวังอย่าให้ด้านบนของ Riser เกิดฟิล์มของแข็งทำให้เกิดสุญญากาศ
- ติดตั้ง Riser บริเวณส่วนหนาของชิ้นงาน



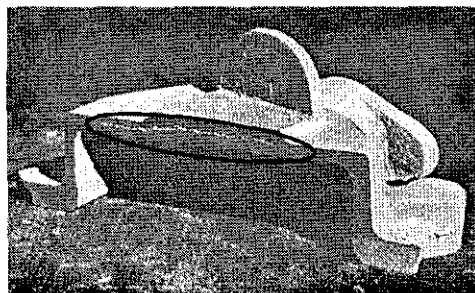
## Centerline Shrinkage

### ■ สาเหตุ

- โลหะหลอมเหลวแข็งตัวทันทีที่สัมผัสแบบแต่บริเวณใจกลางใช้เวลาานานกว่า

### ■ วิธีแก้ไข

- อุ่นแบบ
- เพิ่มอุณหภูมิเท



# Discontinuities

เป็นความไม่ต่อเนื่องของชิ้นงานหล่อ เช่น รอยแยก  
รอยแตก โลหะไม่เป็นเนื้อเดียวกัน

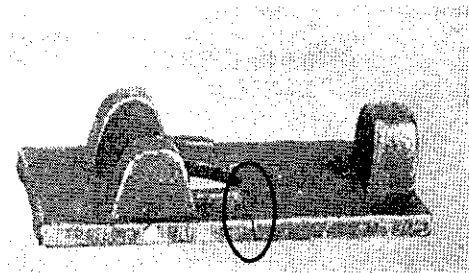
## Breakage

### ■ สาเหตุ

- ชิ้นงานเกิดการแตกหักขณะ  
Cleaning, Handling,  
Machining

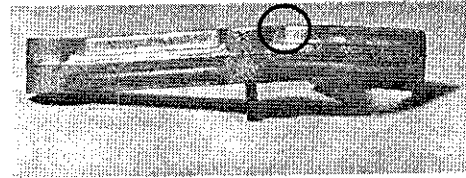
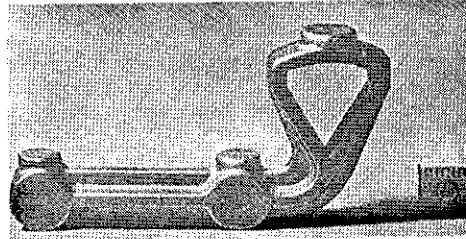
### ■ วิธีแก้ไข

- ระวังการ Cleaning, handling
- Stress relief ก่อน Machining



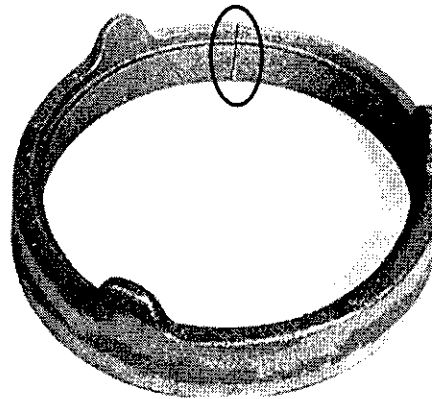
## Hot Cracking

- สาเหตุ
  - ชื้นงานแตกขณะ Shake Out
- วิธีแก้ไข
  - ระวังในการ Shake Out
  - เพิ่ม cycle time



## Cold Tearing

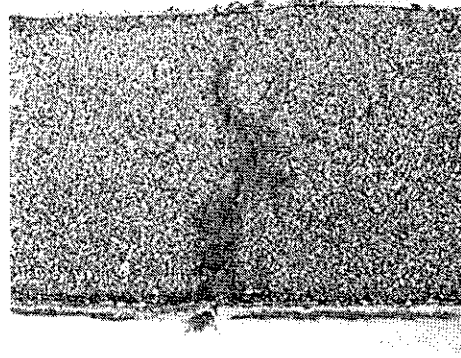
- สาเหตุ
  - ชื้นงานมีอัตราการเย็นตัวต่างกันในแต่ละบริเวณทำให้มีความเค้นตกค้าง
- วิธีแก้ไข
  - ออกแบบชื้นงานหล่อใหม่
  - ออกแบบ gating system และ riser ให้แต่ละบริเวณมีอัตราการเย็นตัวใกล้เคียงกัน



## Hot Tearing

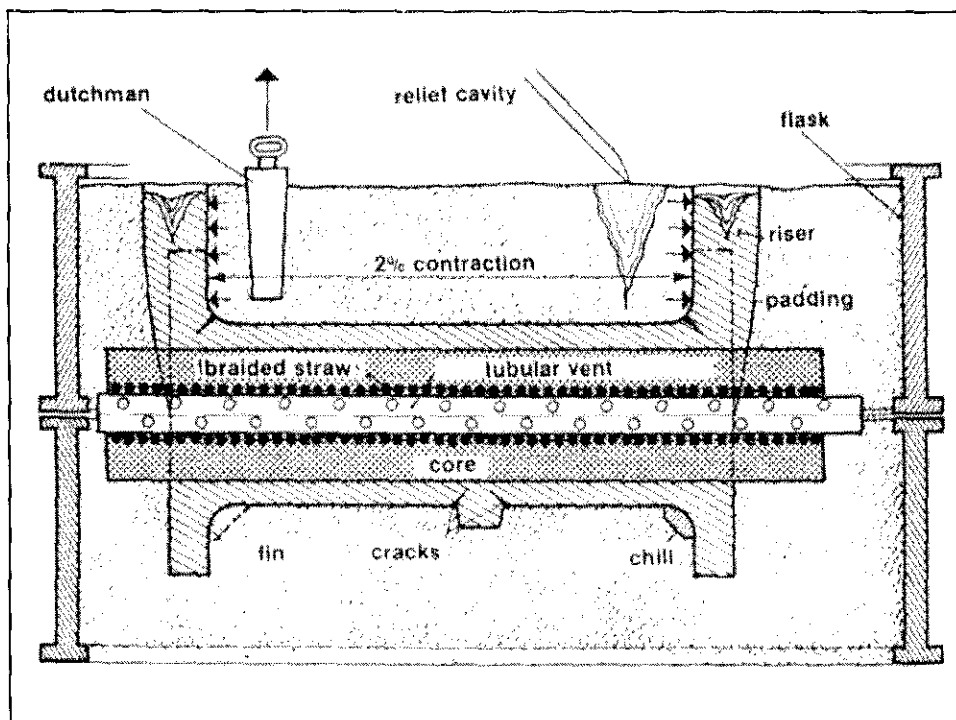
### ■ สาเหตุ

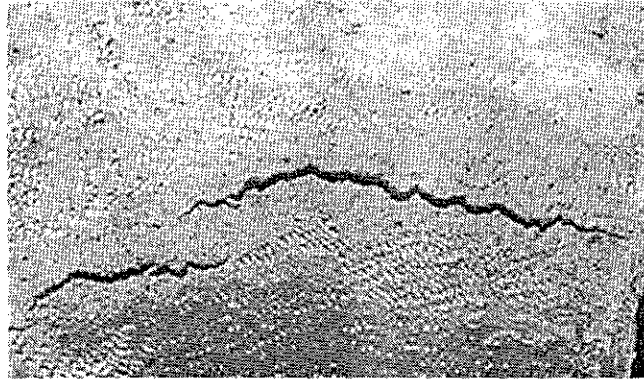
- ชิ้นงานแตกเนื่องจากไม่สามารถหดตัวได้เพราะทรายแบบขวาง การหดตัว เกิดกับชิ้นงานที่มีกิ่งก้านสาขามาก และ/หรือมีรูเทวูล์ขนาดใหญ่



### ■ วิธีแก้ไข

- เพิ่ม Padding, Dutchman, relief cavity
- แก้ไขการออกแบบงานหล่อ





Hot tear in steel casting

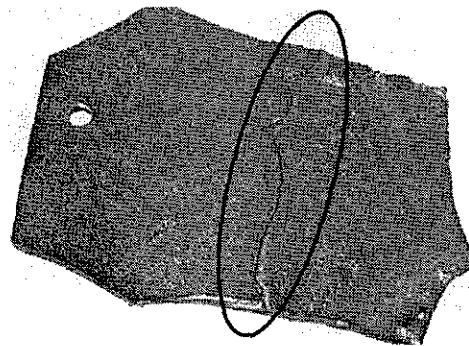
## Cold Shut

### ■ สาเหตุ

- อุณหภูมิเตี้ย
- Fluidity ต่ำเนื่องจากการเกิด Oxidation
- เจาะรูไฉไม่เพียงพอ
- เทโลหะหลอมเหลวช้า หรือไม่ต่อเนื่อง

### ■ วิธีแก้ไข

- เพิ่มอุณหภูมิเท เพิ่ม Fluidity
- เพิ่ม filling rate
- เพิ่มรูไฉ



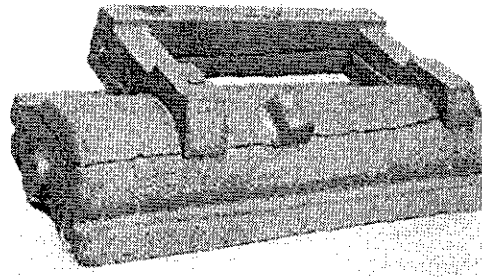
## Interrupted Pour

### ■ สาเหตุ

- โลหะหลอมเหลวใน ladle ไม่เพียงพอ จึงมีการหยุดเทโลหะหลอมเหลว งานหล่อจึงไม่ต่อเนื่อง

### ■ วิธีแก้ไข

- คำนวณปริมาตรของ ladle และขนาด mold + riser + gating system เพื่อหาจำนวนงานหล่อที่สามารถทำได้ในการหลอมหนึ่งครั้ง



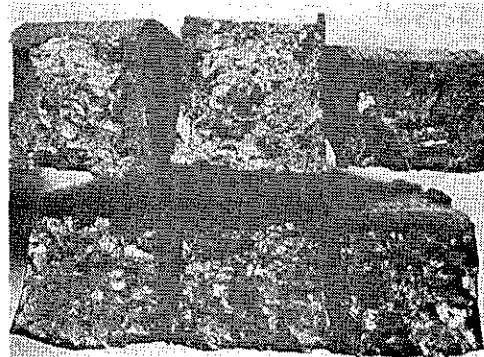
## Rock-Candy Fracture

### ■ สาเหตุ

- เกิดในการหล่อเหล็กกล้าที่มี Al และ Nitrogen มากเกินไป ทำให้เกิด Aluminium nitride ที่ขอบเกรน และเกิดการแตกหัก รอยแตกจะมีผิวคล้ายน้ำตาลกรวด

### ■ วิธีแก้ไข

- ใช้ Al ในปริมาณที่เพียงพอต่อการ Deoxidation เท่านั้น



# Defective Surface

เป็นตำหนิที่ปรากฏบริเวณผิวของชิ้นงาน  
ทำให้ผิวของชิ้นงานไม่สมบูรณ์

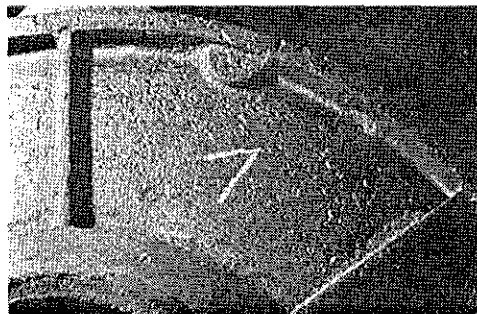
## Surface fold, Gas run

### ■ สาเหตุ

- โลหะหลอมเหลวมีความหนืดมากเกินไป
- อุณหภูมิเตต่ำ
- เกิดปฏิกิริยากับแบบให้แก๊ส

### ■ วิธีแก้ไข

- เพิ่มอุณหภูมิเต
- ใช้ binder หรือวัสดุทำแบบที่ไม่ทำปฏิกิริยาให้แก๊ส





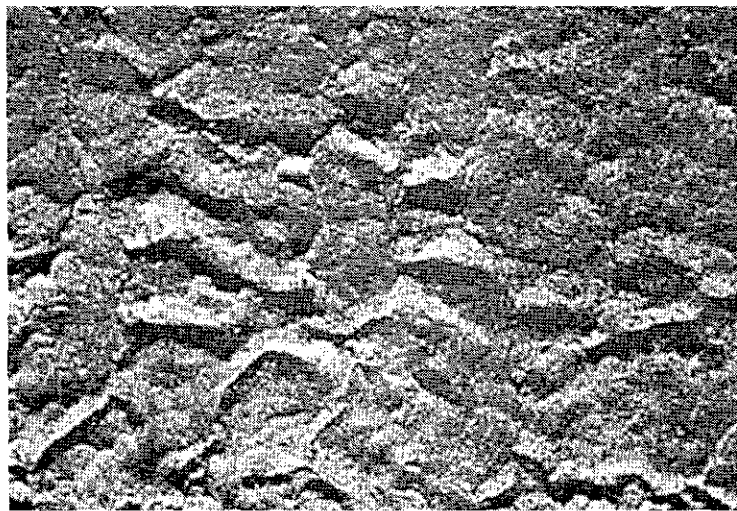
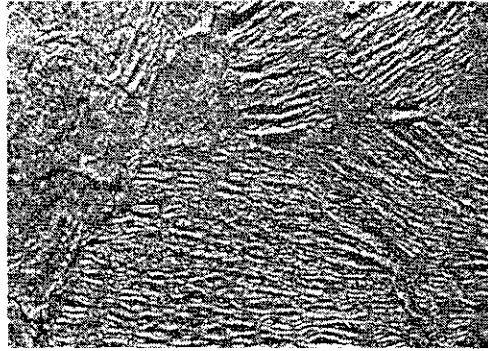
## Elephant skin

### ■ สาเหตุ

- มักเกิดกับชิ้นงานหนา ที่มีผิวแบบ  
ด้านมน เกิดจากสารประกอบ  
oxide, silicate, sulfide จาก Mg  
treatment

### ■ วิธีแก้ไข

- ไม่ควรใช้ปริมาณ Mg มากเกินไป
- ทำความสะอาดโลหะหลอมเหลว  
ลดปริมาณ Sulfur

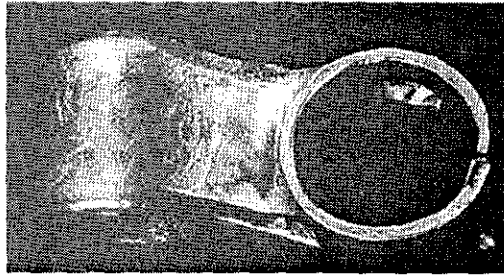


Elephant Skin ขนาดหยาบ

## Seam, Scars

### ■ สาเหตุ

- โลหะหลอมเหลวมีความหนืดเกินไป ทำให้เกิดโลหะของแข็งที่ผิวชิ้นงาน ในขณะที่โลหะหลอมเหลวยังไม่เต็มแบบ
- ทราบแบบเกิดการเคลื่อนตัวที่ คุณหมุมสูง



### ■ วิธีแก้ไข

- เพิ่มอุณหภูมิเต ลดเวลาในการเติมแบบ
- ใช้ binder ที่ทนอุณหภูมิสูงขึ้น

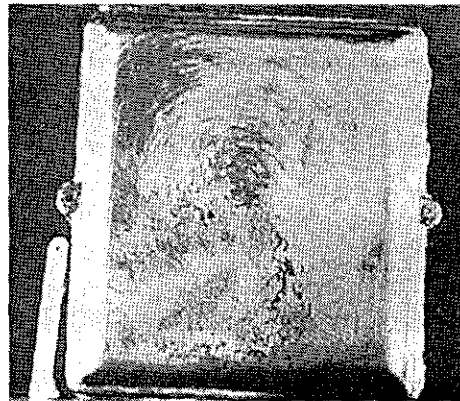
## Flow Marks

### ■ สาเหตุ

- อุณหภูมิเตสูงเกินไปทำให้เกิด oxide film ที่ผิวของโลหะหลอมเหลว แสดงให้เห็นทิศทางการไหลของโลหะหลอมเหลว

### ■ วิธีแก้ไข

- ลดอุณหภูมิเต
- เพิ่มอุณหภูมิแบบ





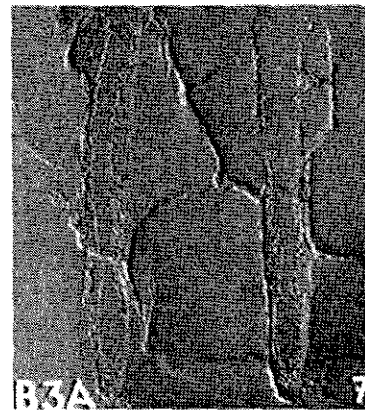
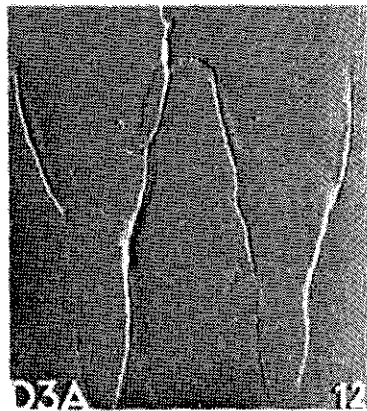
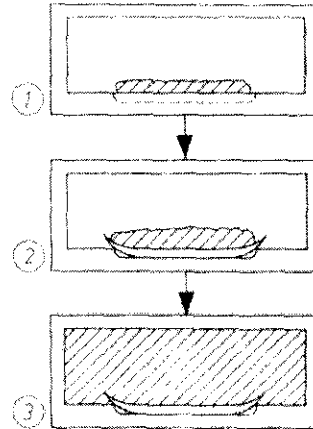
## Rat tail

### ■ สาเหตุ

- ทrolley ที่มีวัดด้านล่างของ drag เกิดการขยายตัวและเกิดร่องบนชิ้นงานเหมือนรอยหางหนูกวาดบนพื้นทrolley

### ■ วิธีแก้ไข

- เพิ่มปริมาณ bentonite
- เพิ่ม special additive โดยเฉพาะ seacoal
- ลด moisture content
- เพิ่ม filling rate



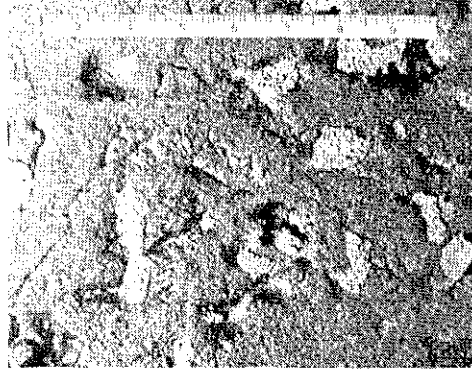
## Crow Feet

### ■ สาเหตุ

- โลหะหลอมเหลวติดขัดกับแม่พิมพ์มากเกินไป
- Gas ในโพรงแบบด้านกรวยของโลหะหลอมเหลว (กรณี bottom gate)

### ■ วิธีแก้ไข

- กำจัดแก๊สในโลหะหลอมเหลว
- ลดระยะทางการเดินของโลหะหลอมเหลว
- เพิ่มจำนวนรูไอ



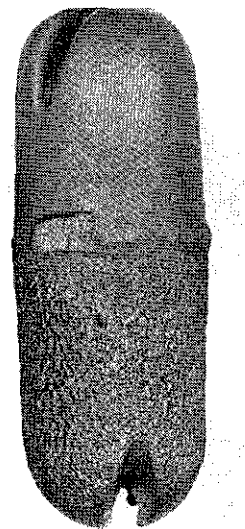
## Orange Peel, Alligator Skin

### ■ สาเหตุ

- เกิดปฏิกิริยาระหว่าง synthetic sand กับโลหะหลอมเหลวทำให้เกิด Gas

### ■ วิธีแก้ไข

- แก้ไขปัญหาเฉพาะหน้าโดยการเพิ่ม  $\text{NaCO}_3$  ในการผสมทราย
- แก้ไขระยะยาว ใช้ synthetic sand ที่เหมาะสม



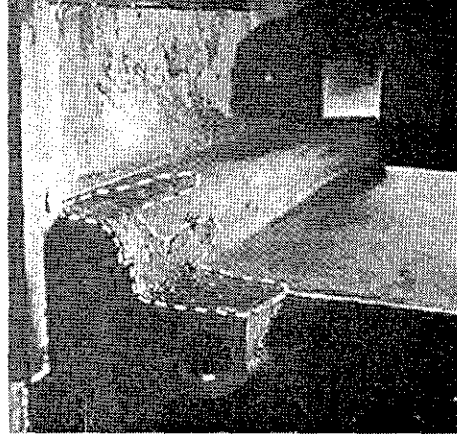
## Soldering, Die Erosion

### ■ สาเหตุ

- โลหะหลอมเหลวกัดเซาะแม่พิมพ์ โดยเฉพาะบริเวณที่โลหะหลอมเหลวมีความเร็วสูง
- เกิดการสึกหรอของแม่พิมพ์ขณะนำชิ้นงานออกจาก

### ■ วิธีแก้ไข

- ใช้ระบบทางเดินโลหะหลอมเหลวที่เหมาะสม
- ใช้ die lubricant ในปริมาณที่เหมาะสม
- เพิ่ม draft angle เพื่อให้ชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ง่าย



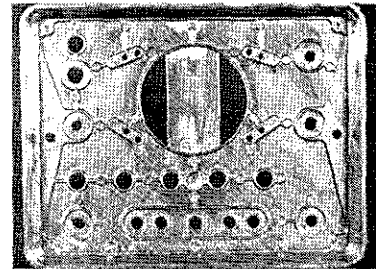
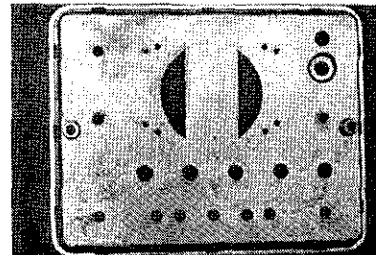
## Sink Marks

### ■ สาเหตุ

- เกิดการหดตัวของโลหะหลอมเหลวที่บริเวณที่เป็นส่วนหนา

### ■ วิธีแก้ไข

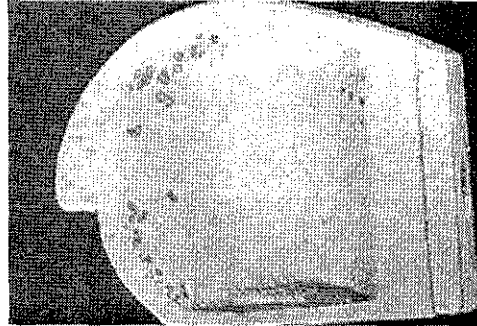
- ออกแบบหลีกเลี่ยงการเปลี่ยนความหนาอย่างฉับพลัน เช่น เพิ่มส่วนเฉียง
- วาง riser ที่บริเวณเสี่ยง



## Slag Inclusion

### ■ สาเหตุ

- เกิดปฏิกิริยาระหว่างโลหะหลอมเหลวกับแม่แบบ ทำให้เกิดตะกอนฝังที่ผิวชิ้นงาน และหลุดออกในขั้นตอนทำความสะอาดเป็นช่องว่างที่ผิว เป็นมากกับโลหะหลอมเหลวที่มี Cr สูง



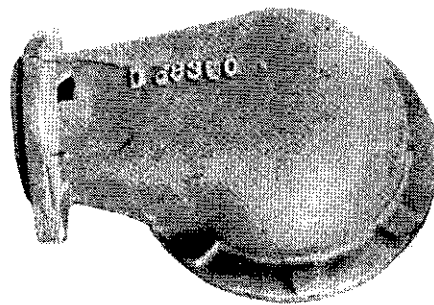
### ■ วิธีแก้ไข

- ลดอุณหภูมิเท
- ปลดปล่อยให้เย็นตัวใน Reduce Atmosphere

## Push Up, Clamp Off

### ■ สาเหตุ

- เกิดจากการวางแม่แบบบนฐานที่ไม่สะอาด ทRAY ที่อยู่ด้านล่างจะทำให้โพรงแบบยุบเป็นบางส่วน
- เกิดจากการใช้ Clamp บีบแม่แบบด้วยแรงมากเกินไป



### ■ วิธีแก้ไข

- ระวัง!

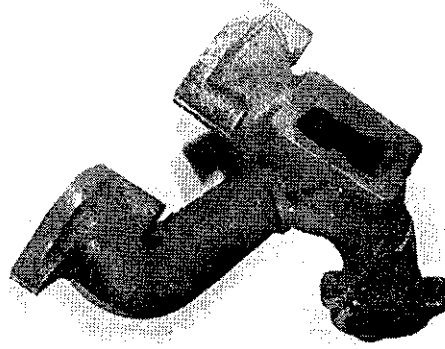
## Burn On

### ■ สาเหตุ

- ทราบดีมี Refractoriness ต่ำเกินไป
- จุดอุณหภูมิสูงเกินไป

### ■ วิธีแก้ไข

- ปรับปรุงการนำทรายกลับมาใช้ใหม่  
ระวังอย่าให้ทรายปนเปื้อนมาก ซึ่งจะ  
ทำให้มี Refractoriness ต่ำลง
- ลดอุณหภูมิเต
- เพิ่มแรงในการดำแบบ
- หลีกเลี่ยง hot spot



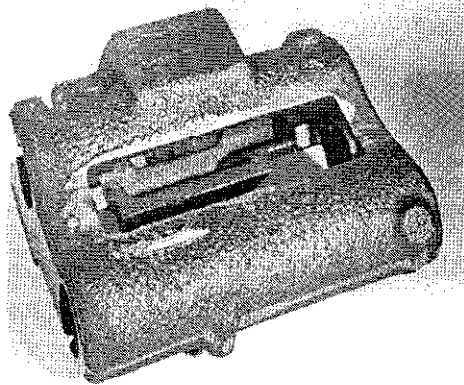
## Burn In

### ■ สาเหตุ

- ทรายมี Refractoriness ต่ำเกินไป
- จุดอุณหภูมิสูงเกินไป
- ทรายมีความหนาแน่นต่ำ

### ■ วิธีแก้ไข

- ปรับปรุงการนำทรายกลับมาใช้ใหม่  
ระวังอย่าให้ทรายปนเปื้อนมาก ซึ่งจะ  
ทำให้มี Refractoriness ต่ำลง
- ลดอุณหภูมิเต
- เพิ่มแรงในการดำแบบ
- หลีกเลี่ยงการออกแบบที่มี hot spot





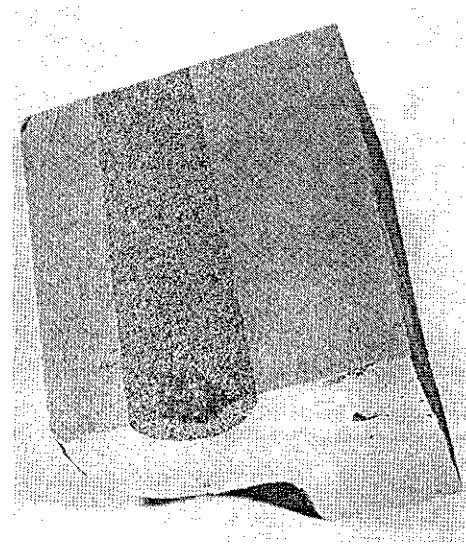
## Metal Penetration

### ■ สาเหตุ

- โลหะหลอมเหลวมี P, Si, Mn มากเกินไปสำหรับเหล็กหล่อ
- มี P หรือ Pb มากเกินไปสำหรับโลหะผสมทองแดง
- แร่ดินโลหะหลอมเหลวมากเกินไป
- ทราายมีความหนาแน่นต่ำเกินไปหรือหยาบเกินไป
- ทราายแบบ binder มากเกินไป

### ■ วิธีแก้ไข

- แก้ไขตามสาเหตุ



## Scabbing

- Cope Scab
- Drag Scab
- Spalling Scab

## Cope Scab

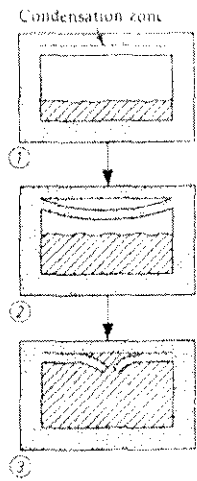


Figure 163

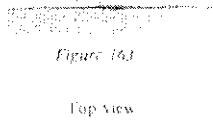


Figure 164

D 131 - Buckles

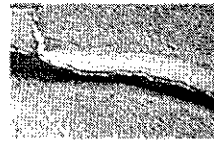
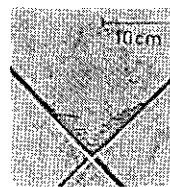
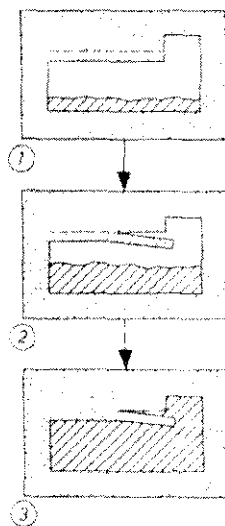
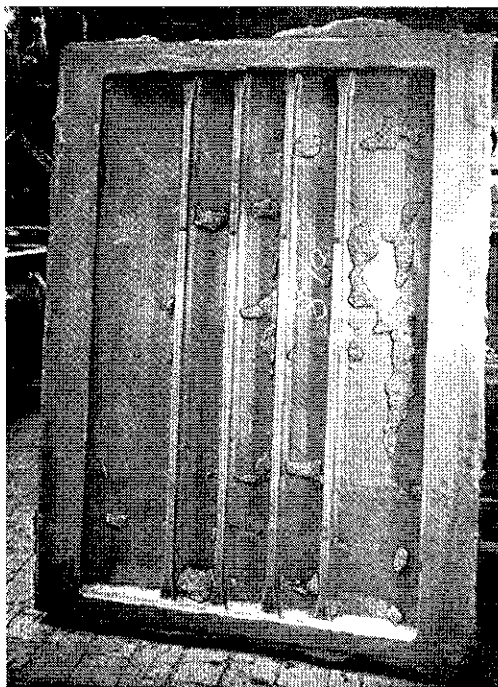
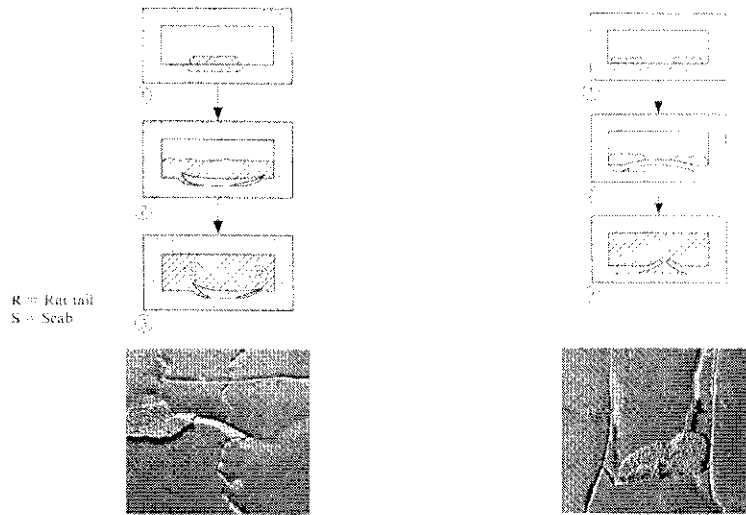


Figure 165

## Cope Scab

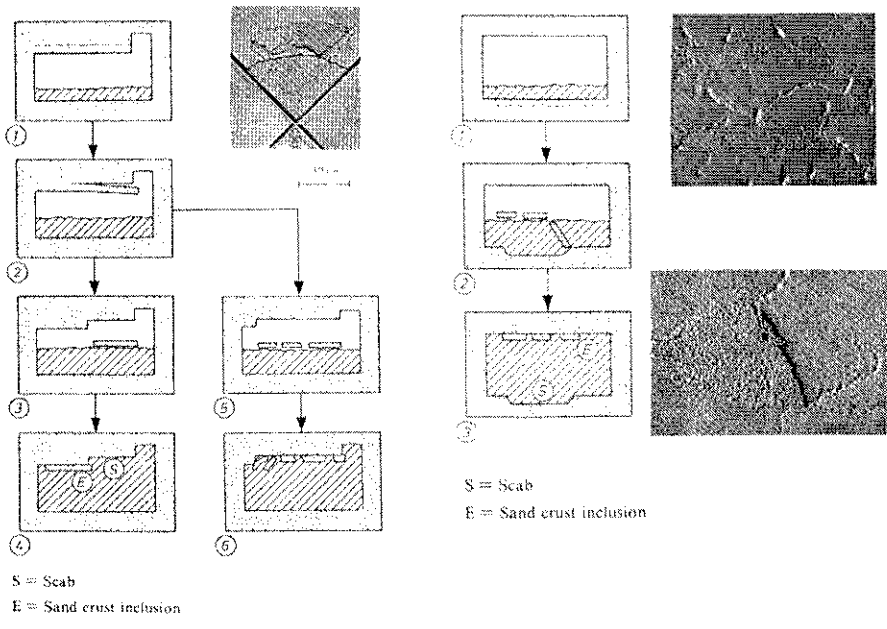
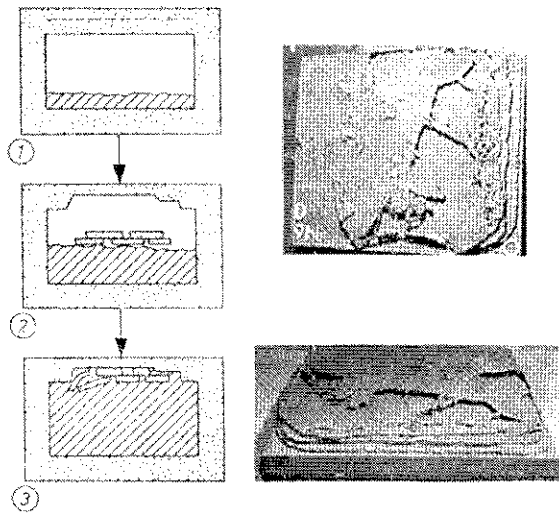


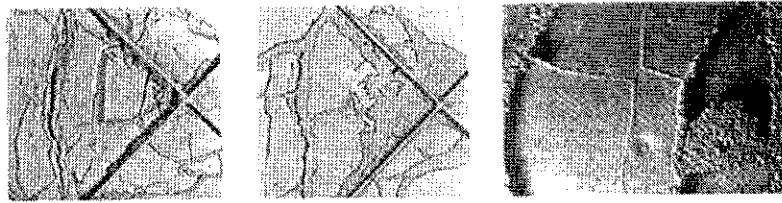
## Drag Scab



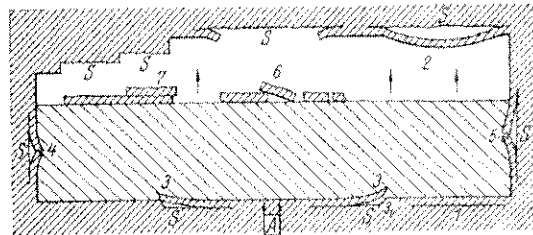
Scabbing

# Spalling Scab

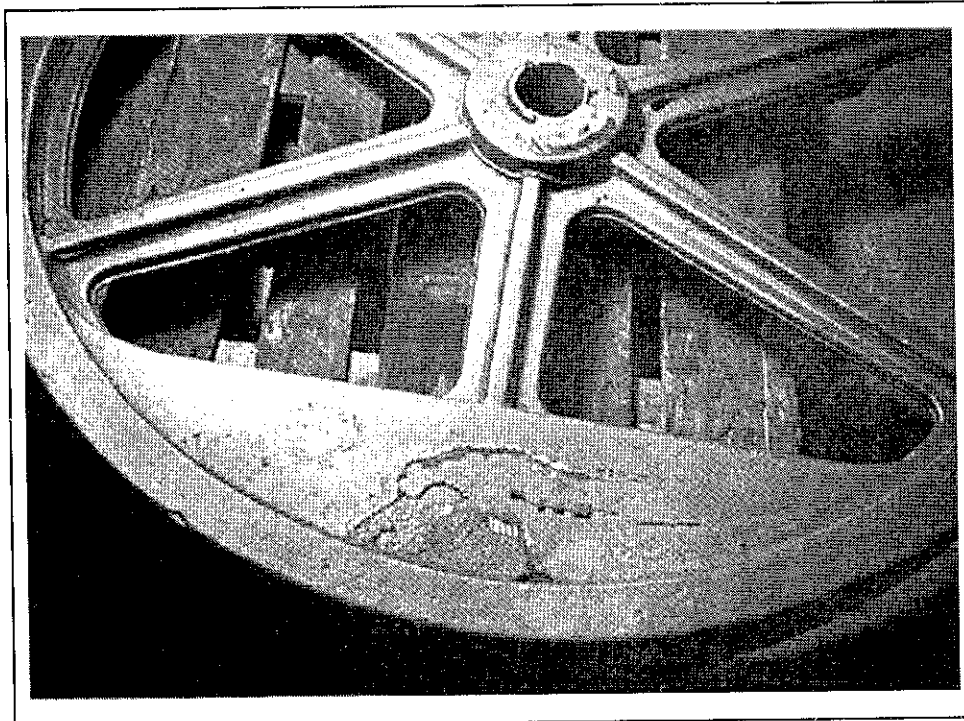




Schematic Representation of Defects Due to Sand Expansion.



A = Gate.  
 S = Spalling of sand crusts at condensation zones.



## Incomplete Casting

ชิ้นงานหล่อไม่ครบถ้วนสมบูรณ์

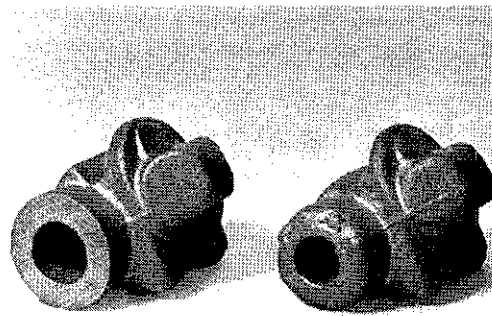
### Misrun

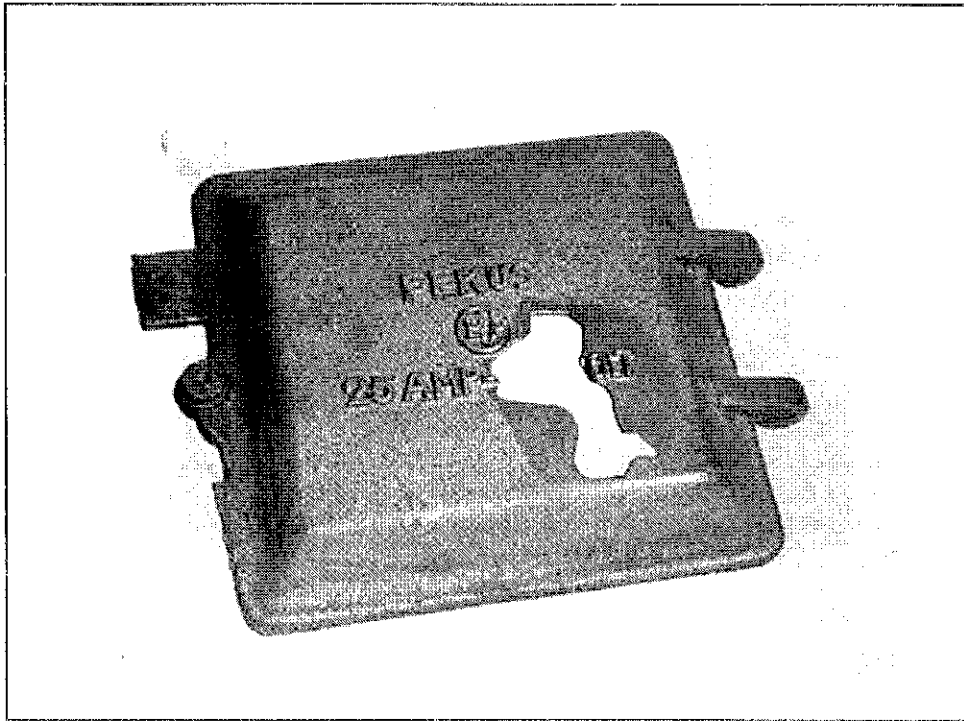
#### ■ สาเหตุ

- โลหะหลอมเหลวมี Fluidity ต่ำ
- Filling rate ต่ำ
- เจาะรูได้น้อยเกินไป
- แบบมีอุณหภูมิต่ำเกินไป

#### ■ วิธีแก้ไข

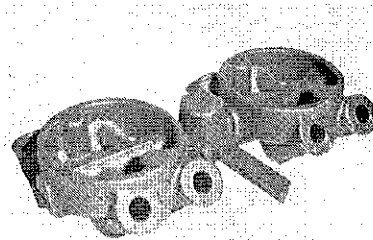
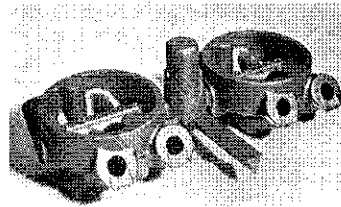
- แก้ไขตามสาเหตุ





### Poured Short

- สาเหตุ
  - โลหะหลอมเหลวใน ladle มีน้อยเกินไป
- วิธีแก้ไข
  - แก้ไขตามสาเหตุ



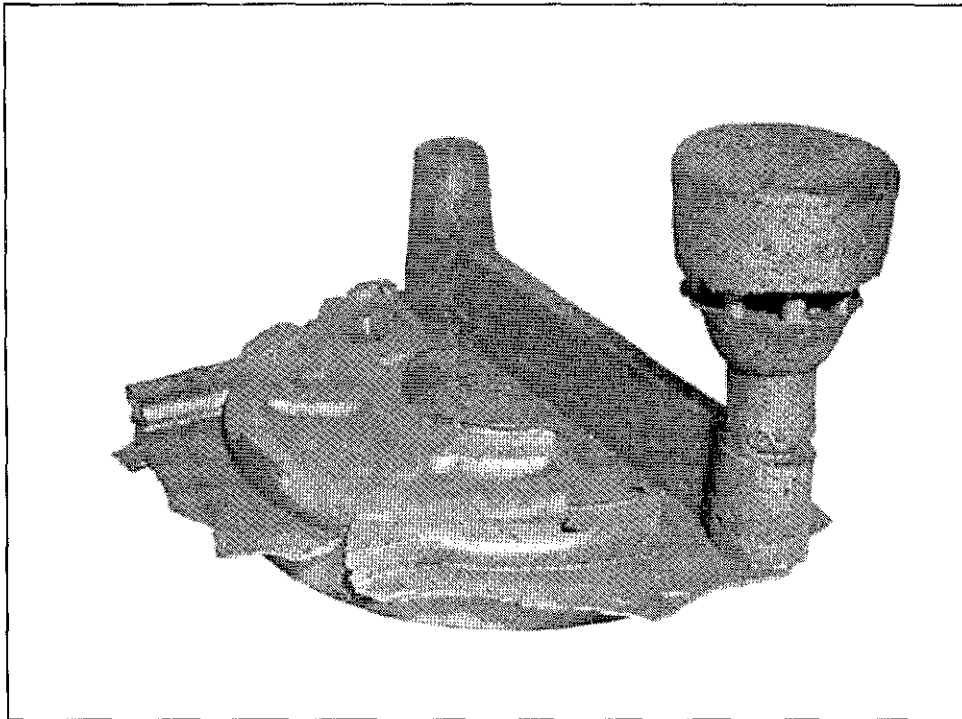
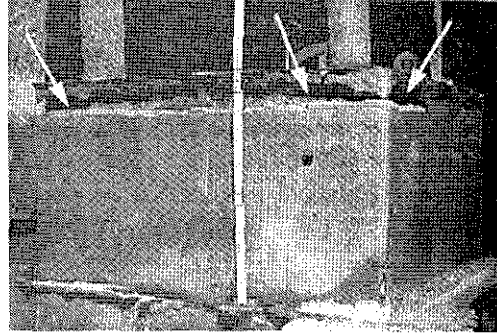
## Run Out

### ■ สาเหตุ

- .. แรงดันโลหิตไหลสูง แทรก  
ซีมไหลออกจากรอยต่อหีบแบบ
- รอยต่อระหว่างหีบแบบไม่สนิท
- รื้อแบบเร็วเกินไป

### ■ วิธีแก้ไข

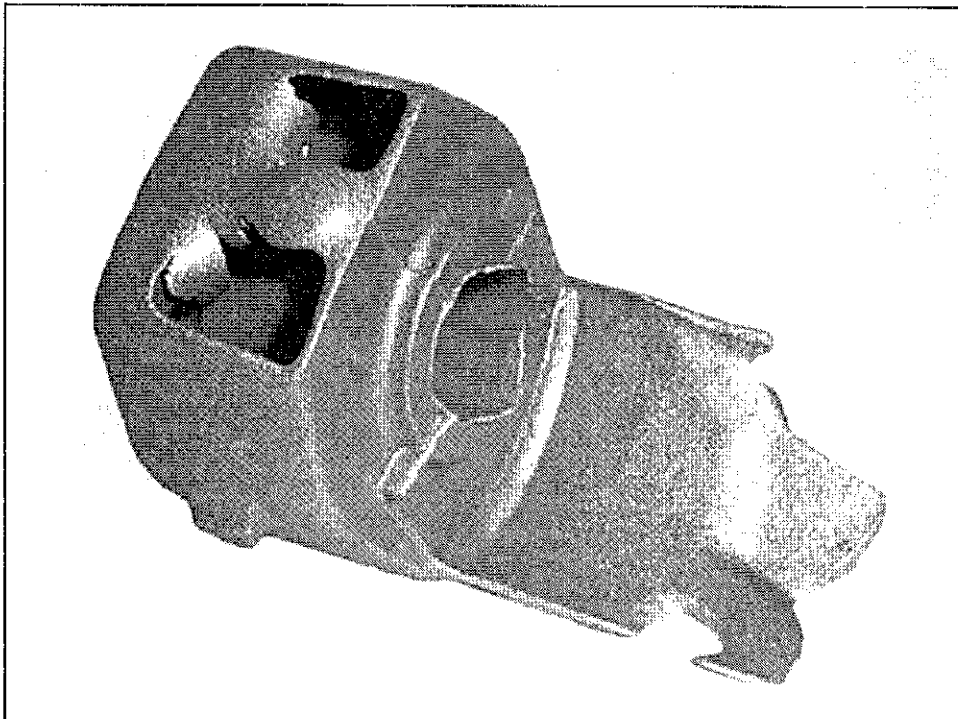
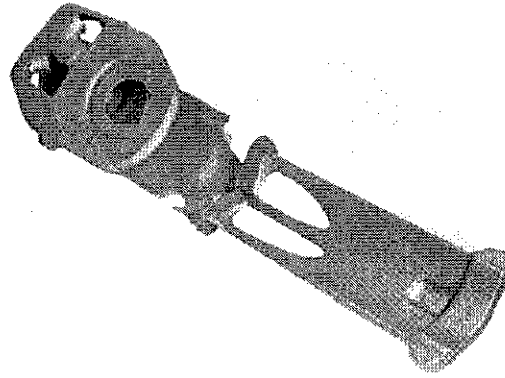
- แก้ไขตามสาเหตุ





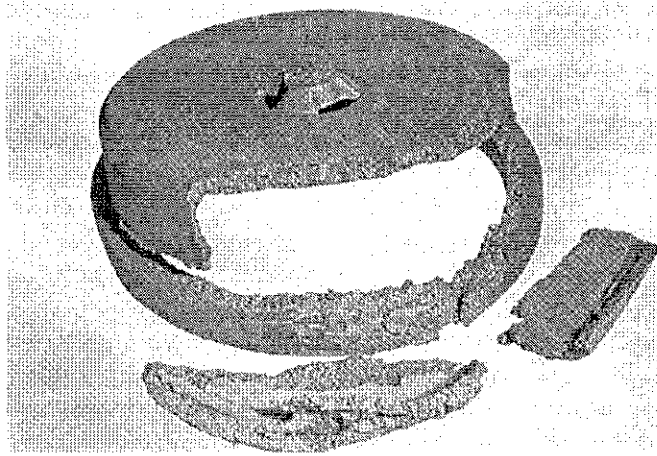
## Excessive Cleaning

- สาเหตุ
  - ทำความสะอาดชิ้นงานนานเกินไป มากเกินไป ทำให้ชิ้นงานแห้งที่บริเวณมุมและส่วนบาง
- วิธีแก้ไข
  - แก้ไขตามสาเหตุ



## Early Shakeout

- สาเหตุ
  - ร้อนแบบเร็วเกินไป
- วิธีแก้ไข
  - แก้ไขตามสาเหตุ



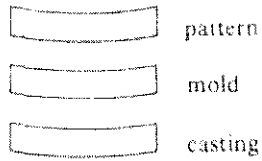
## Incorrect Dimension and Shape

ชิ้นงานมีรูปร่างและ/หรือขนาดคลาดเคลื่อน

## Deformed Pattern

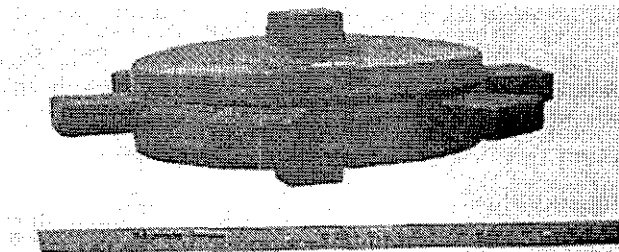
### ■ สาเหตุ

- Pattern ช้ำวูด สึกหรือ
- เก็บรักษา Pattern ไว้ในที่  
ปราศจากความชื้นและปลวก



### ■ วิธีแก้ไข

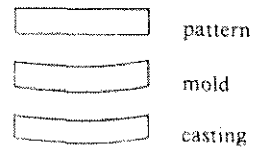
- แก้ไขตามสาเหตุ



## Mold Creep, Deform Mold

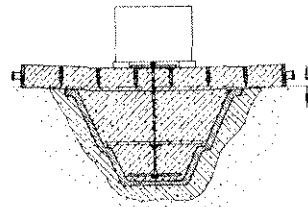
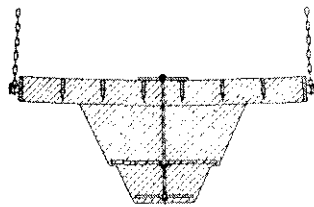
### ■ สาเหตุ

- Pattern ปิดเบียดขณะต้ำแบบ
- แบบเสียรูปร่างระหว่างการ  
เคลื่อนย้าย



### ■ วิธีแก้ไข

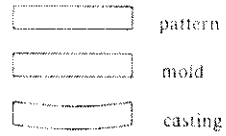
- แก้ไขตามสาเหตุ



## Casting Distortion

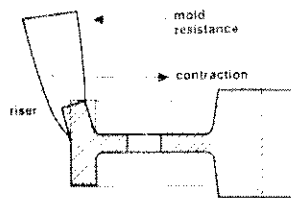
### ■ สาเหตุ

- ชิ้นงานหดตัวได้ยาก เนื่องจากเกรง  
ออกแบบชิ้นงาน รูเท รูลัน
- รื้อแบบเร็วเกินไป

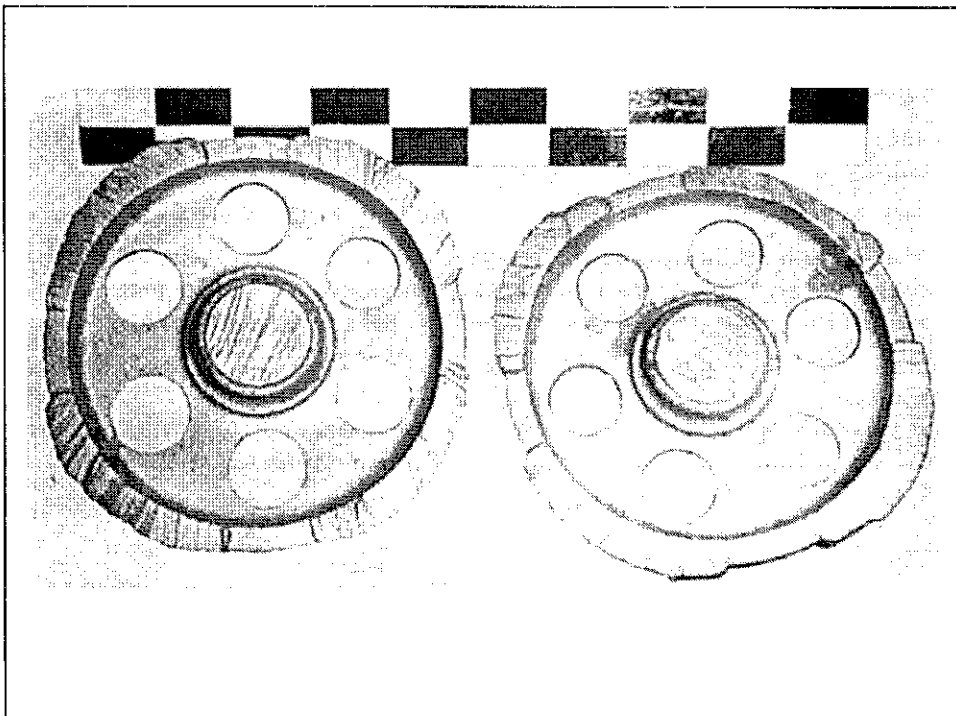
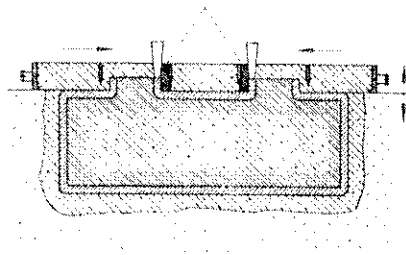


### ■ วิธีแก้ไข

- แก้ไขตามสาเหตุ



Collapsible cantary cores  
(Dutchmen)



## Structural Anomalies

โครงสร้างจุลภาคไม่เหมาะสม

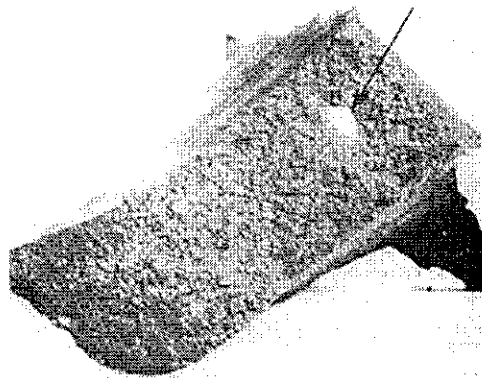
## Metallic Inclusion

### ■ สาเหตุ

- โลหะหลอมเหลว หลอมโม่สมบูรณ์ มี intermetallic compound ที่มีจุดหลอมตัวสูง
- สำหรับ Al-Si-Cu ได้แก่ สารประกอบพวก Fe-Al-Mn-Si
- เกิด intermetallic compound ระหว่างการแข็งตัวและแยกตัวลอยอยู่ในโลหะที่ยังเป็นของเหลว

### ■ วิธีแก้ไข

- ปรับส่วนผสมทางเคมีให้เหมาะสม
- เพิ่มอุณหภูมิเท
- ทำความสะอาดโลหะหลอมเหลว



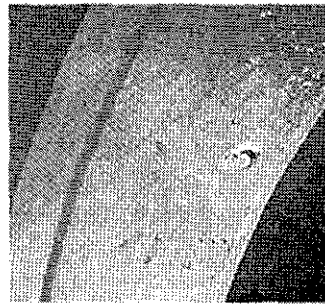
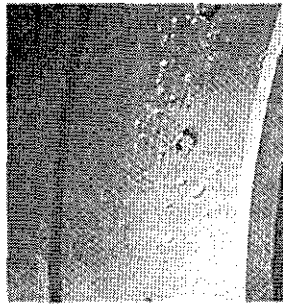
## Cold Shot

### ■ สาเหตุ

- หยดโลหะหลอมเหลวแข็งตัวก่อนและไม่หลอมตัวกลับเมื่อเทโลหะหลอมเหลวที่เหลือ

### ■ วิธีแก้ไข

- เทโลหะหลอมเหลวให้ตรงจุด ถ้าเทพลาดจะเกิดโลหะหลอมเหลวอาจกระเด็นเข้าไปในโพรงแบบ



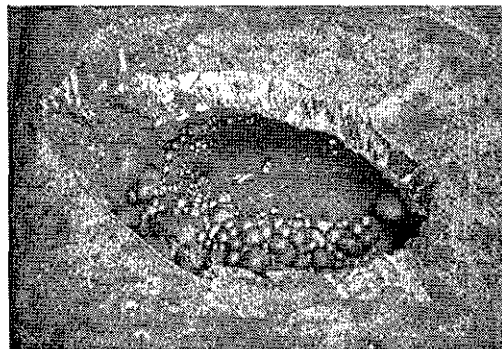
## Internal Sweat

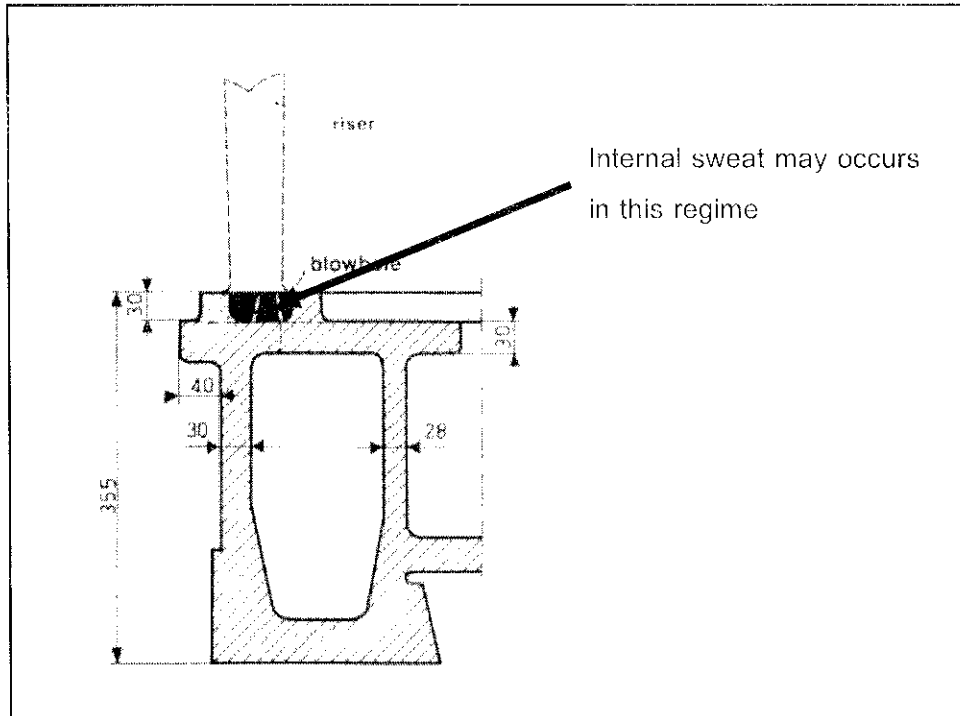
### ■ สาเหตุ

- โลหะหลอมเหลวมี P มากเกินไป ทำให้เกิดปฏิกิริยา Eutectic ที่อุณหภูมิต่ำและเมื่อขึ้นงานหดตัว จึงดันให้โลหะหลอมเหลวส่วนที่เหลือพุ่งออกมาที่ผิว เกิดขึ้นภายในชิ้นงานบริเวณที่เป็น Blow hole หรือ Shrinkage cavity

### ■ วิธีแก้ไข

- ป้องกันการเกิด Blow hole และ Shrinkage cavity
- ลดปริมาณ P ในโลหะหลอมเหลว





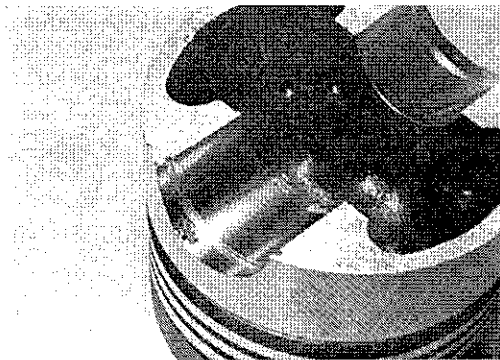
## Slag Inclusion

### ■ สาเหตุ

- เกิดการดูดวักเอา Slag ที่เกิดจากการใช้ Fluxing Material เข้าไปโพรงแบบ

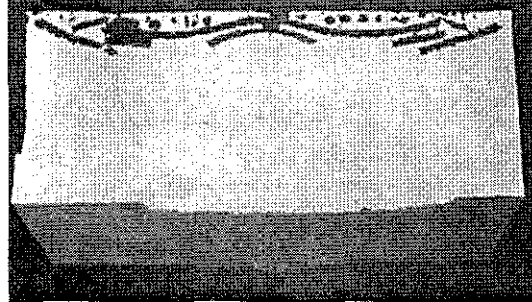
### ■ วิธีแก้ไข

- ออกแบบ gating system ให้มีการดัก slag
- การใช้ Bottom pour ladle ช่วยป้องกันการดูดวัก slag ได้
- ใช้ Strainer หรือ filter ทรกลง slag



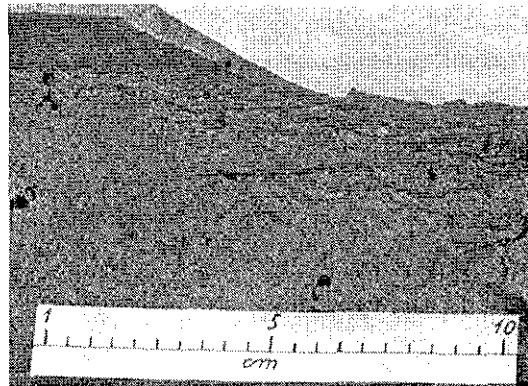
## Sand Inclusion

- สาเหตุ
  - เกิดการหลุดลอกของแบบทรายแล้วเข้าไปฝังตัวในชิ้นงาน
- วิธีแก้ไข
  - แก้ไขตามสาเหตุ



## Lustrous Carbon Film

- สาเหตุ
  - แผ่นกราฟิตสะท้อนแสง เกิดจากปฏิกิริยาของสารที่ใช้ทำแบบที่มีองค์ประกอบของคาร์บอน เข้าไปฝังตัวในชิ้นงาน เช่น ผงกราฟิตที่ใช้เพื่อให้ถอด pattern ง่าย หรือสำหรับแยกหนีบแบบ
- วิธีแก้ไข
  - ลดปริมาณการใช้สารที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ





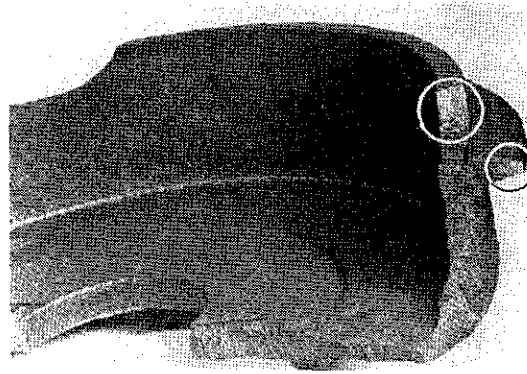
## Primary Chill

### ■ สาเหตุ

- เกิดโครงสร้างเหล็กหล่อสีขาว เนื่องจากส่วนบางของชิ้นงานมีอัตราการเย็นตัวสูงเกินไป

### ■ วิธีแก้ไข

- ปรับค่า C.E ให้เหมาะสม
- Inoculate ให้พอเพียง
- ลด Carbide forming element เช่น Cr



## Carbon Flotation

### ■ สาเหตุ

- ค่า C.E สูงเกินไป
- หลังจาก treatment แล้วทิ้งเวลานานเกินไปจึงเทโลหะหลอมเหลว
- อัตราการแข็งตัวช้าเกินไป

### ■ วิธีแก้ไข

- ปรับค่า C.E ดังนี้
  - 10 mm C.E. = 4.5 max
  - 30 mm C.E. = 4.3 max
- หลัง inoculation แล้วไม่ควรทิ้งไว้นานเกิน 10 นาที

Casting showing carbon flotation



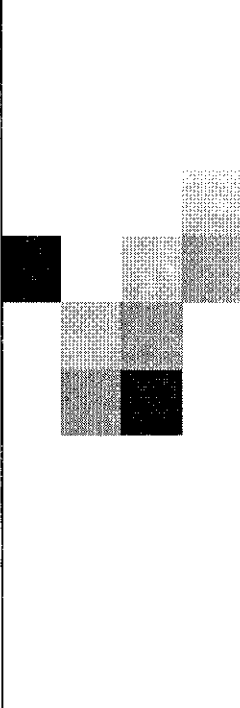
Figure 268

Sample casting of graduated cylindrical section sizes, poured horizontally. Structure is normal and sound.




Figure 269

Same as above, except that the heavier section thicknesses show carbon flotation, defect G 263.



## บทที่ 14 การออกแบบงานหล่อ

### Casting Design

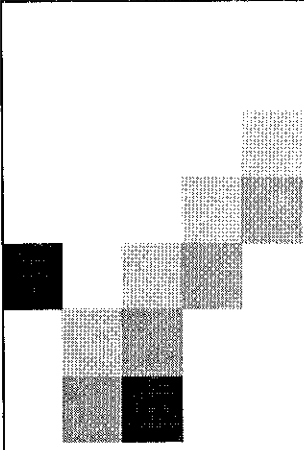


#### หลักในการออกแบบงานหล่อ

- Function Design
- Simplification of Foundry Practice
- Metallurgical Design
- Economic Design

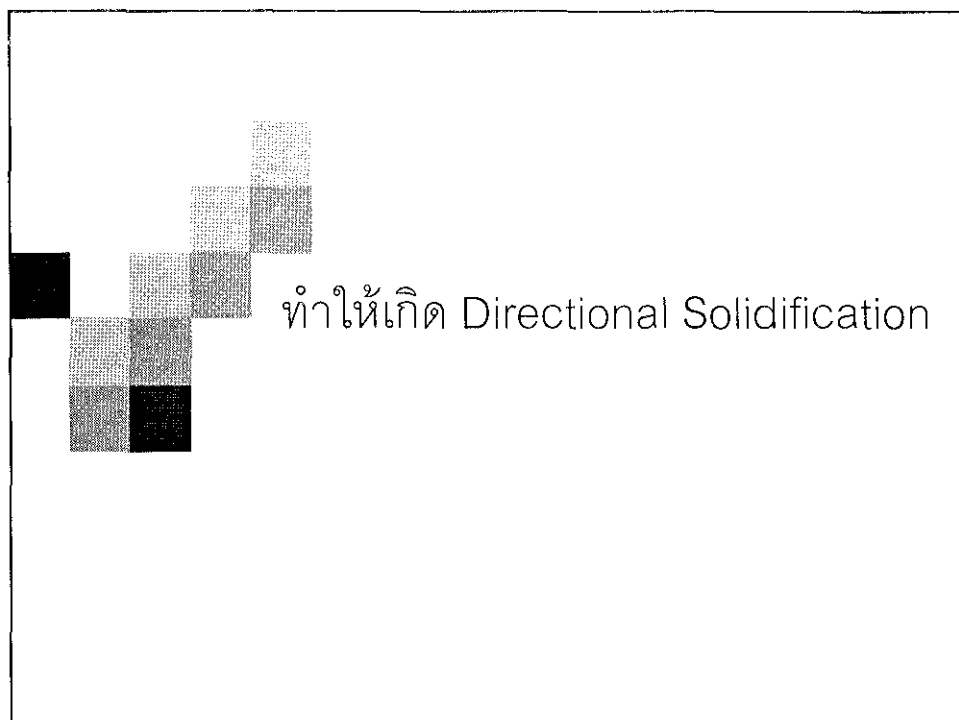
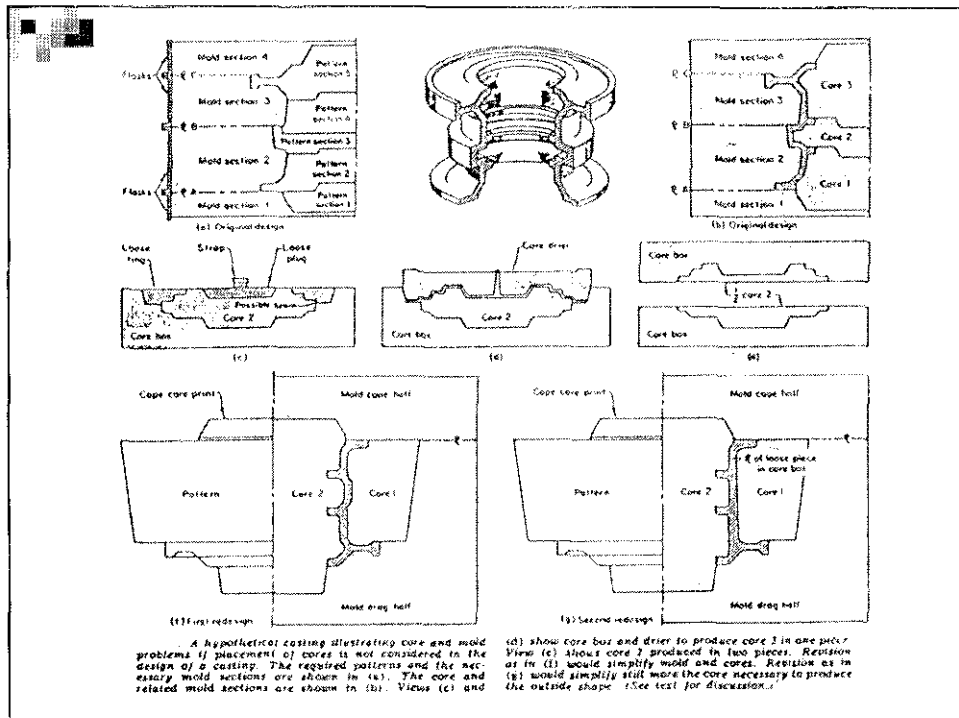
## Simplification of Foundry Practice

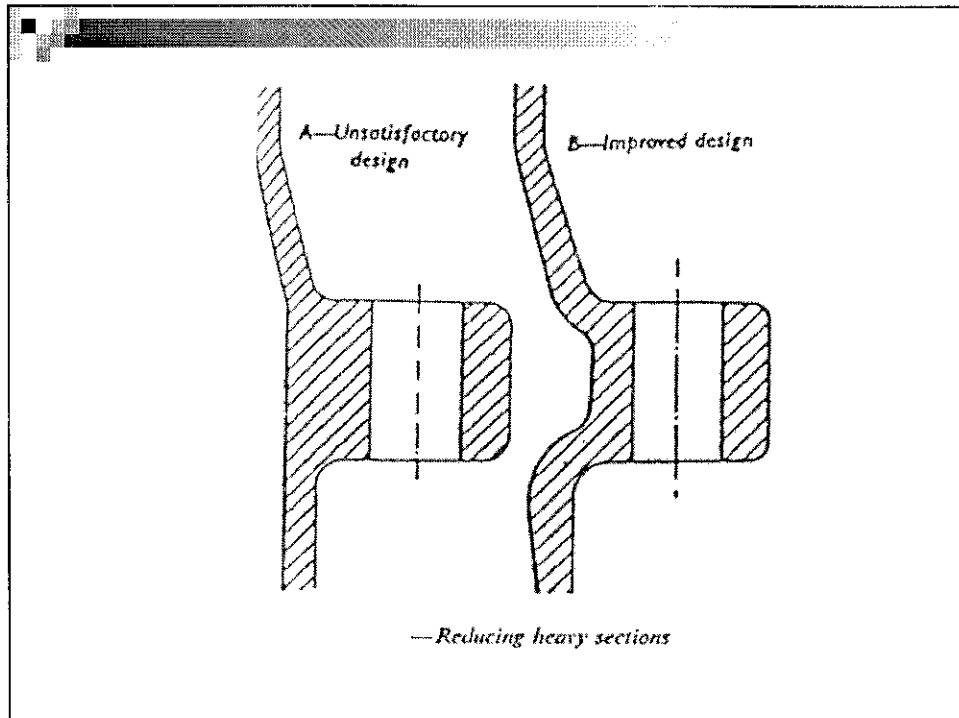
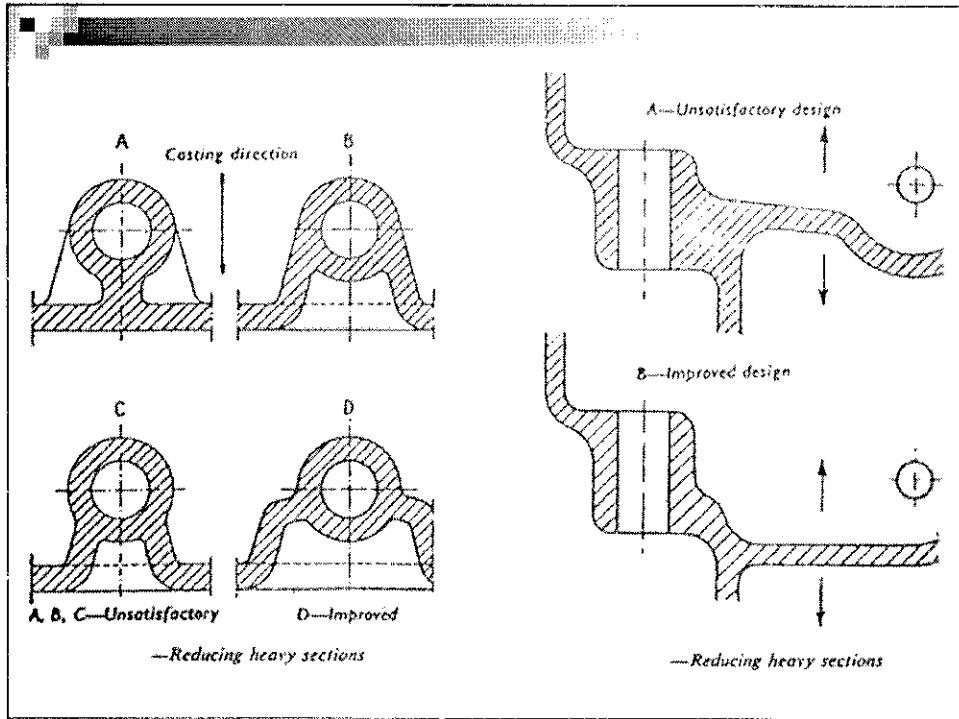
- ทำให้ง่ายในการทำแบบ
- ทำให้เกิดการแข็งตัวอย่างมีทิศทาง (Directional Solidification)
- ทำให้ Junction มีความสมบูรณ์
- อื่น ๆ เช่น ลดความเค้น, ระบายไอดีง่ายขึ้น, ลดการใช้ Chaplet, รื้อแบบได้ง่ายขึ้น เป็นต้น

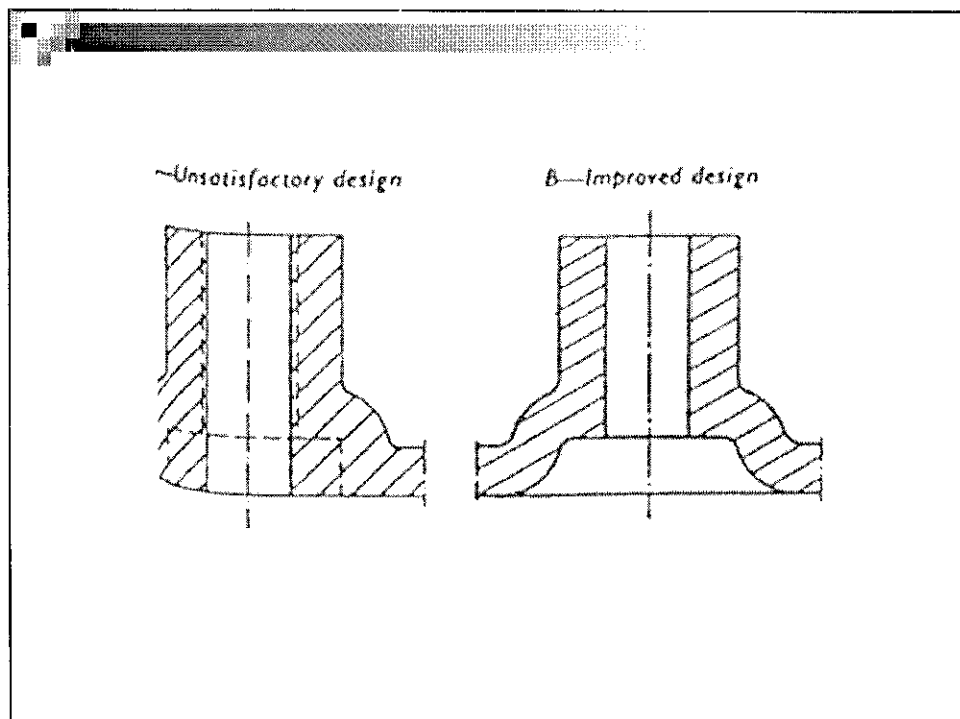
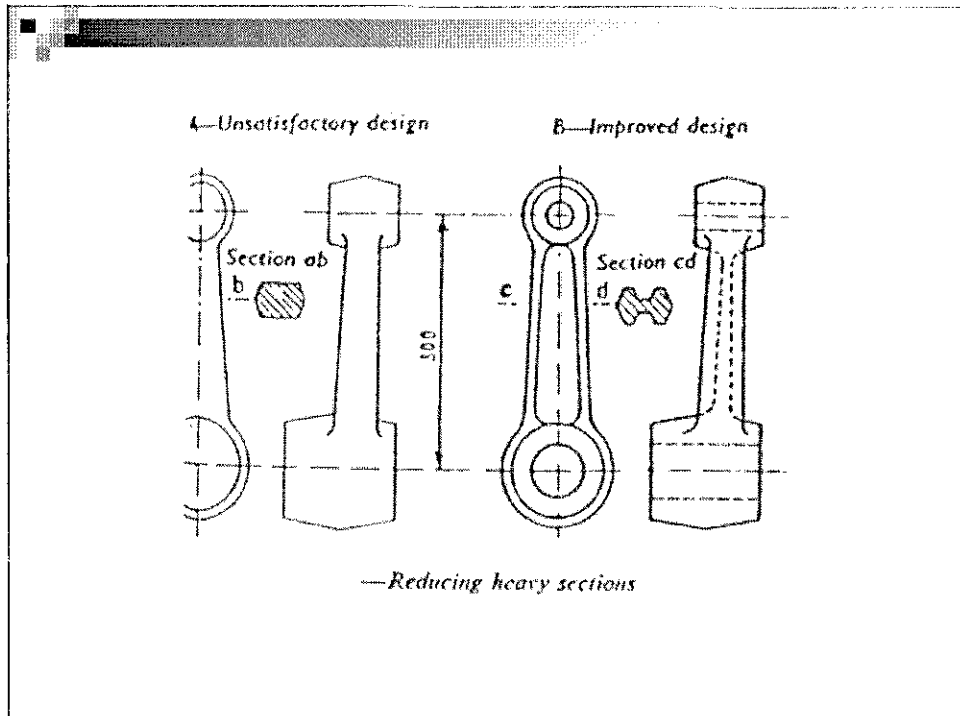


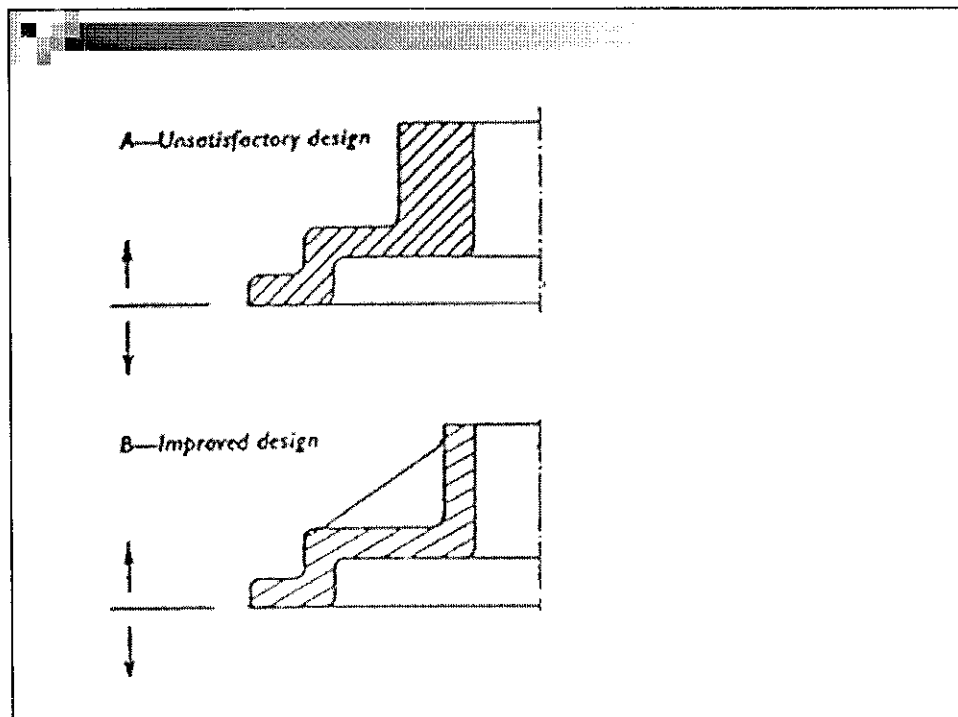
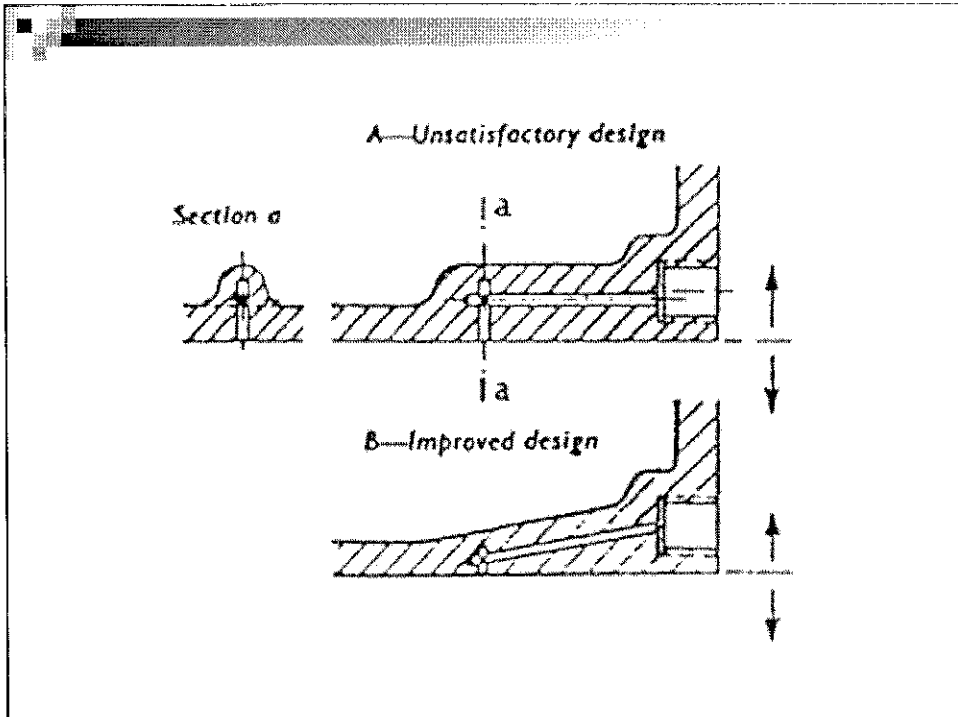
ทำให้ง่ายต่อการทำแบบ



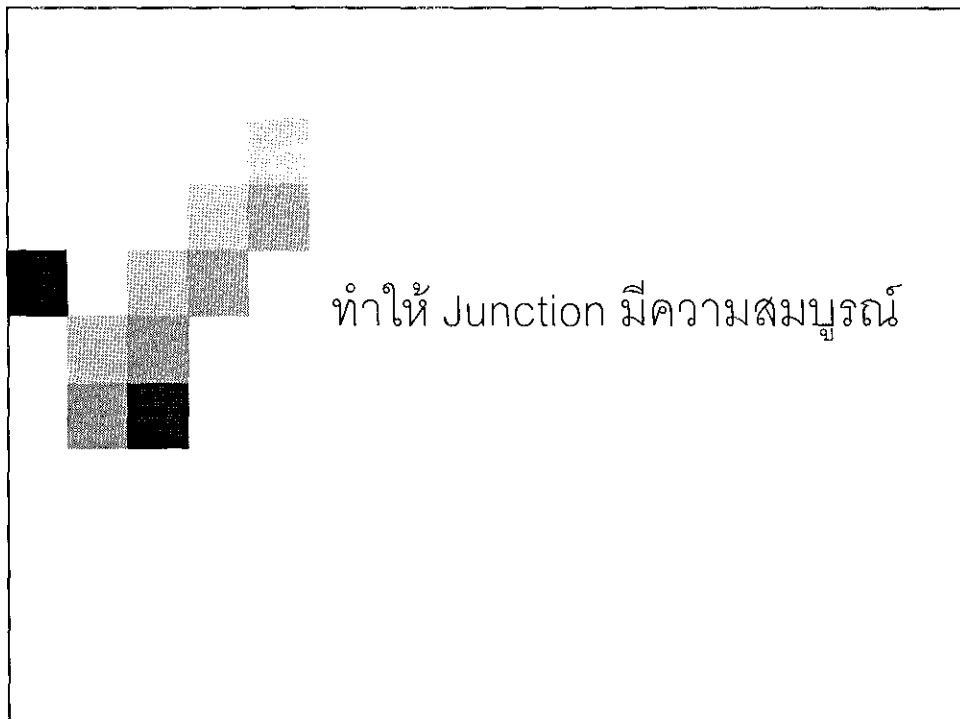
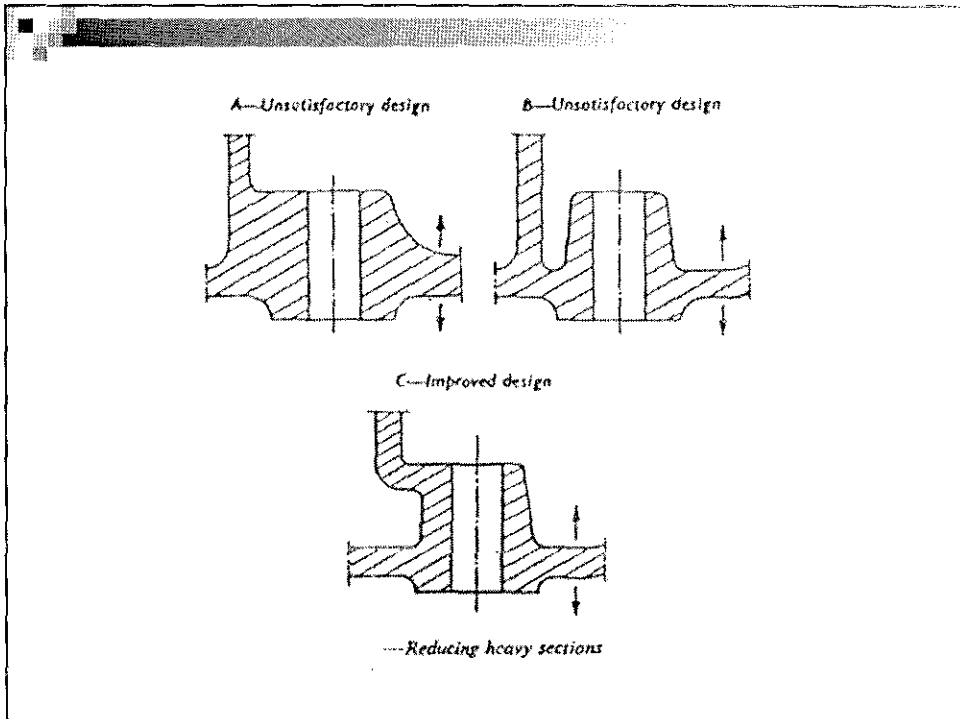


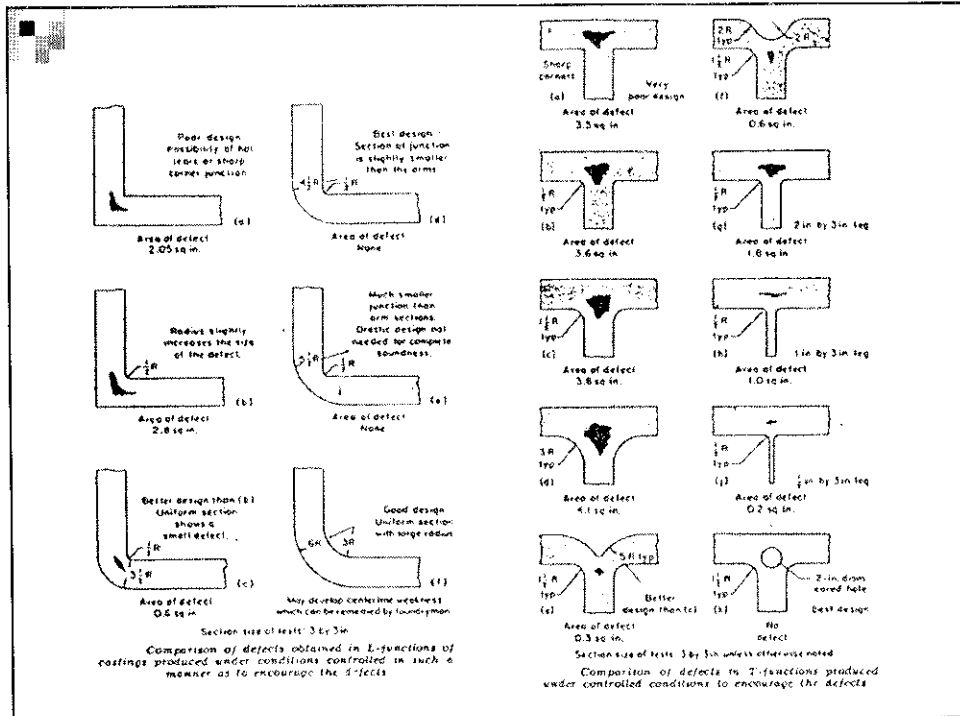
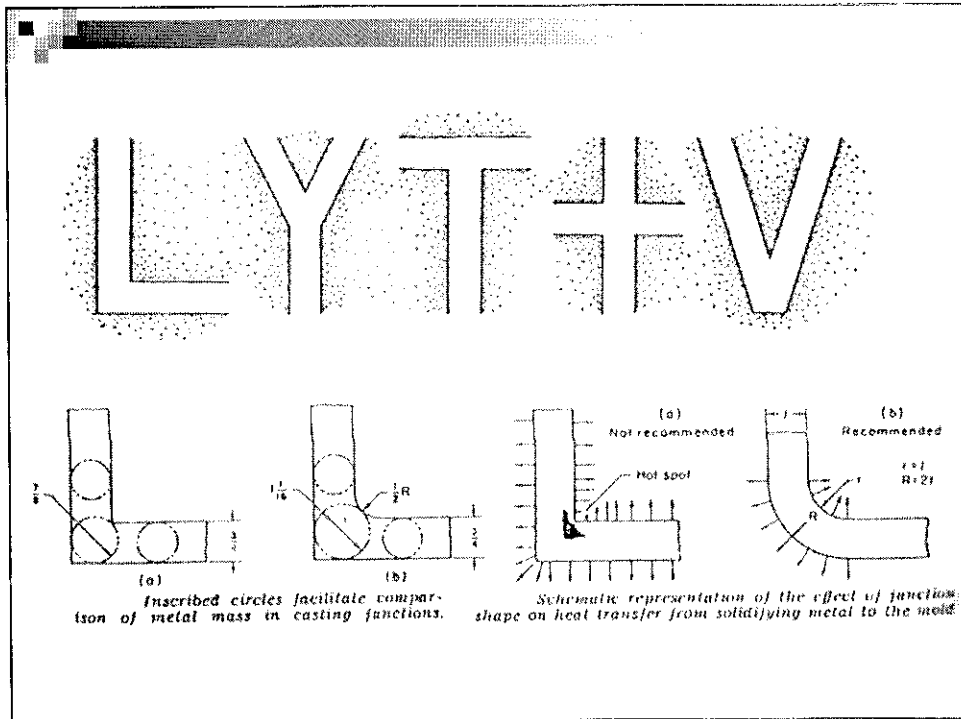


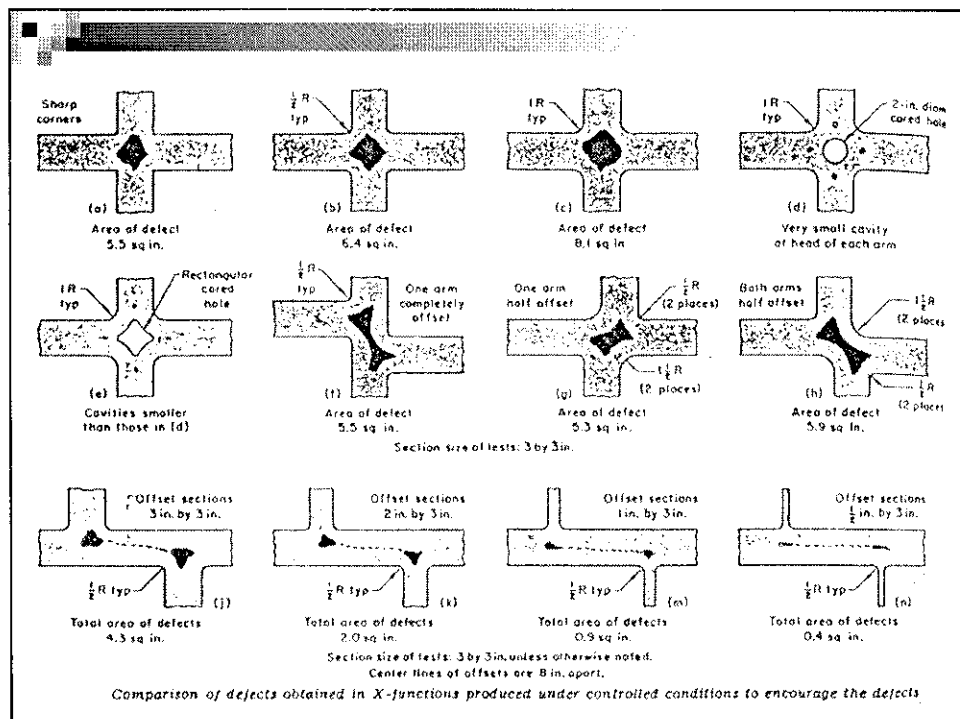
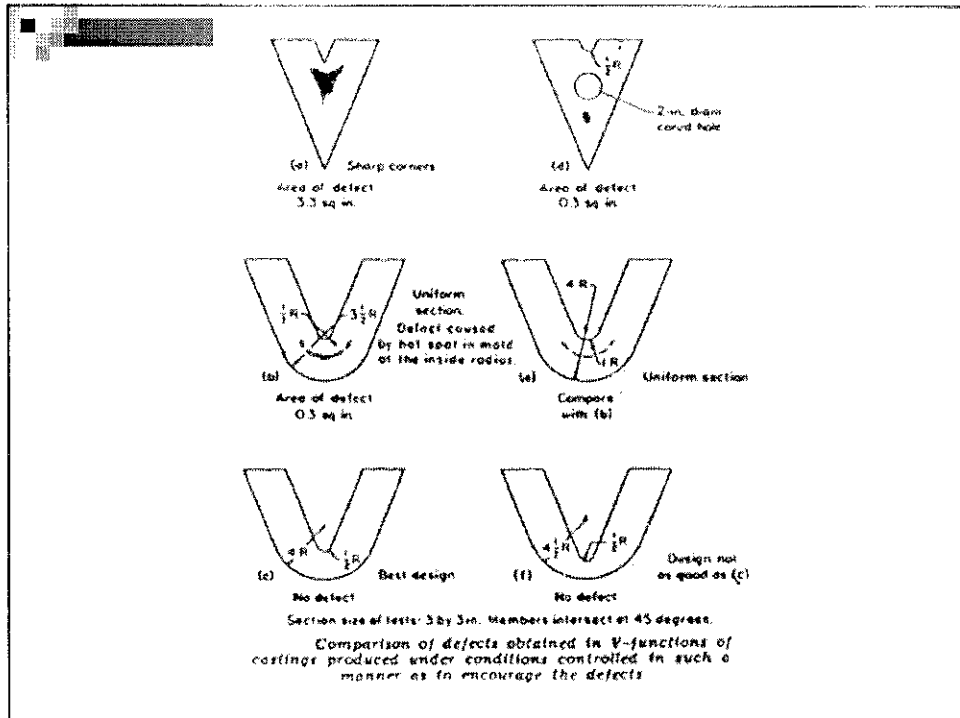


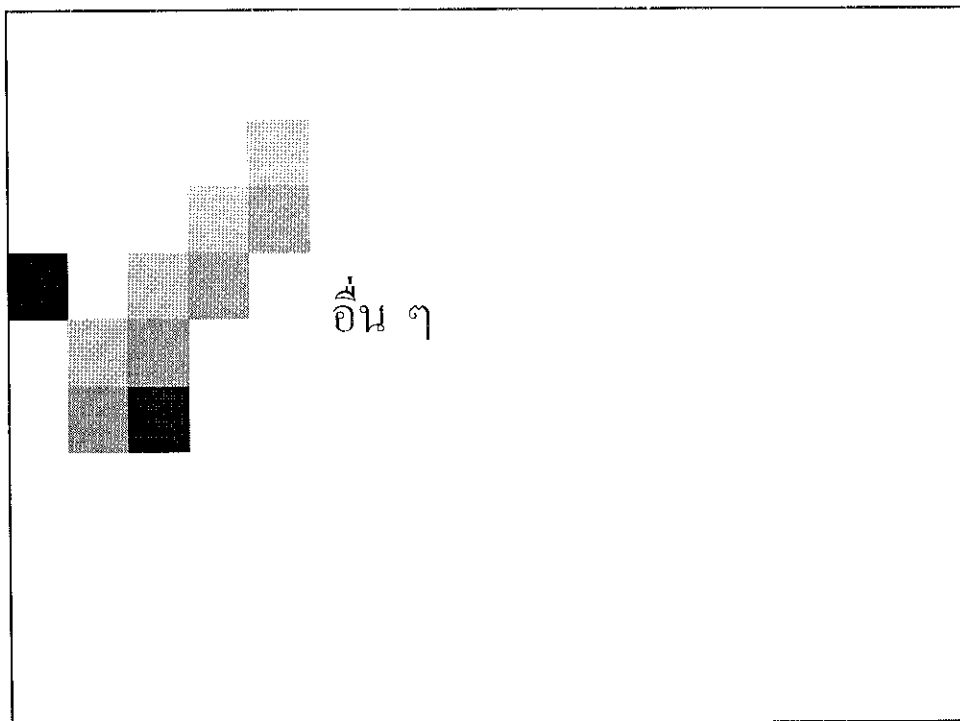
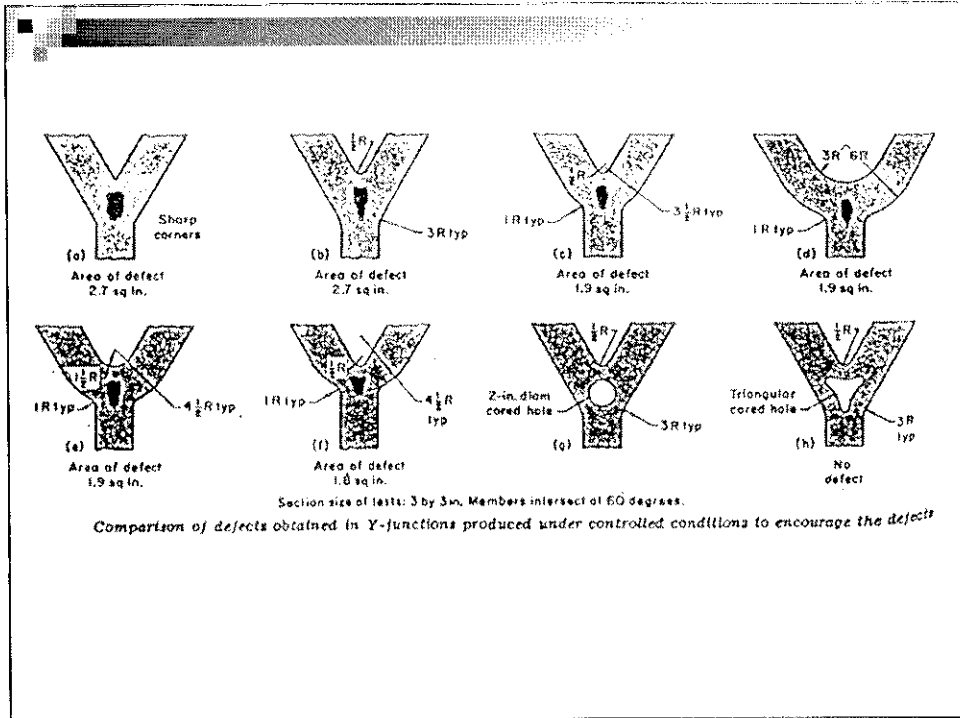


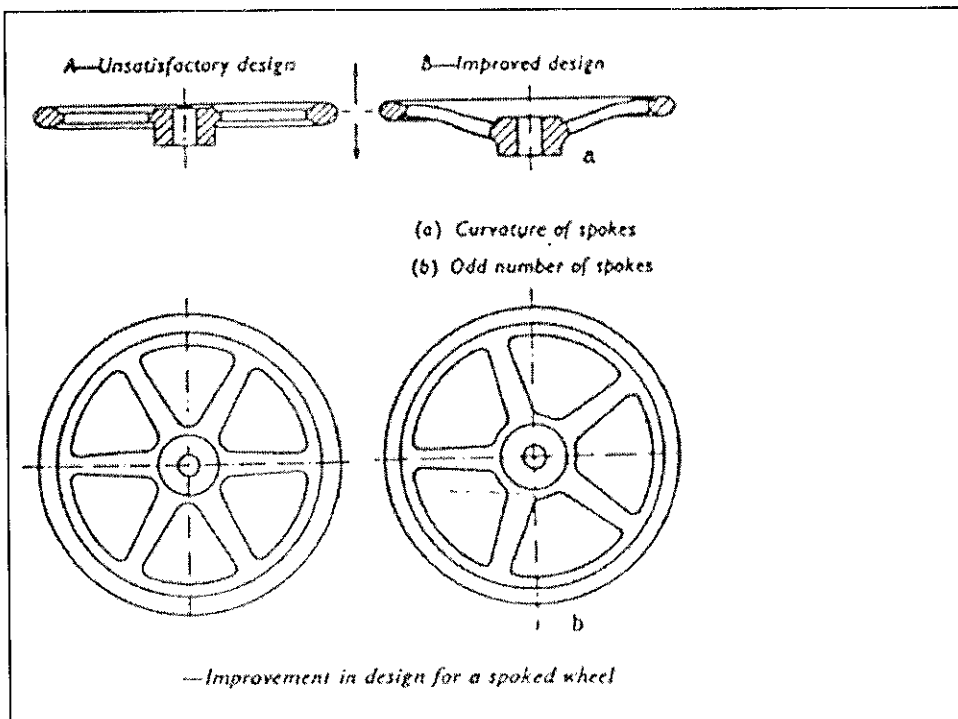
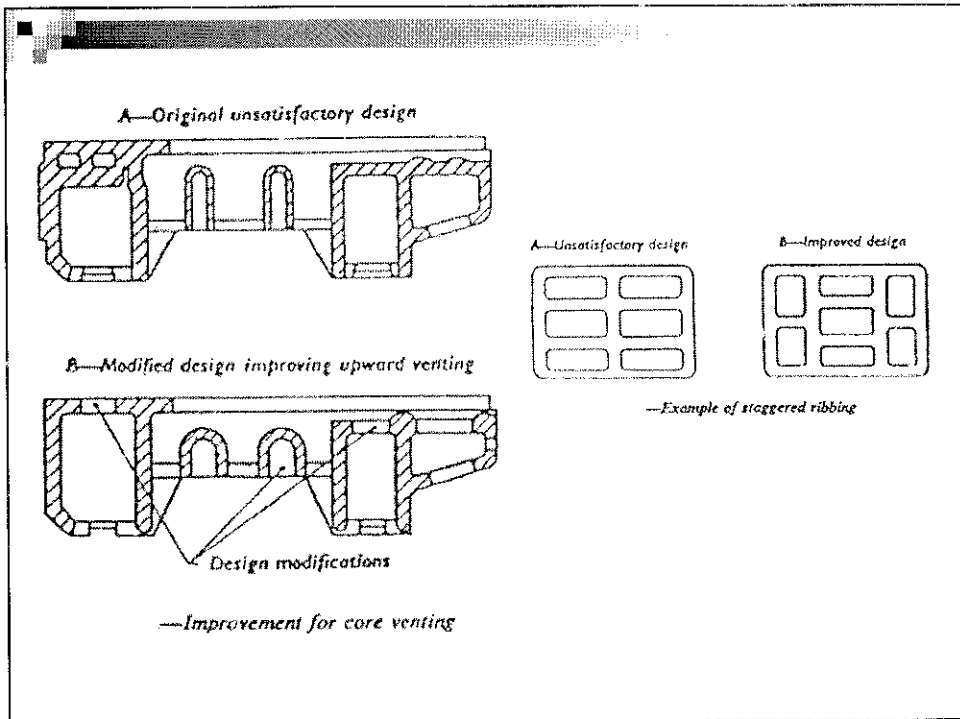


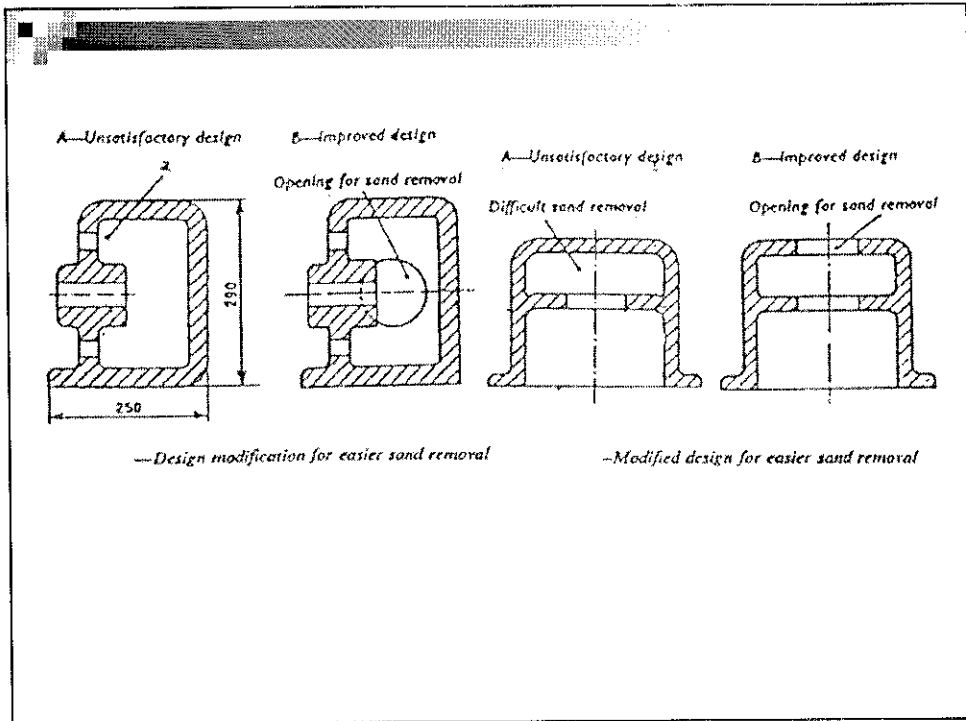
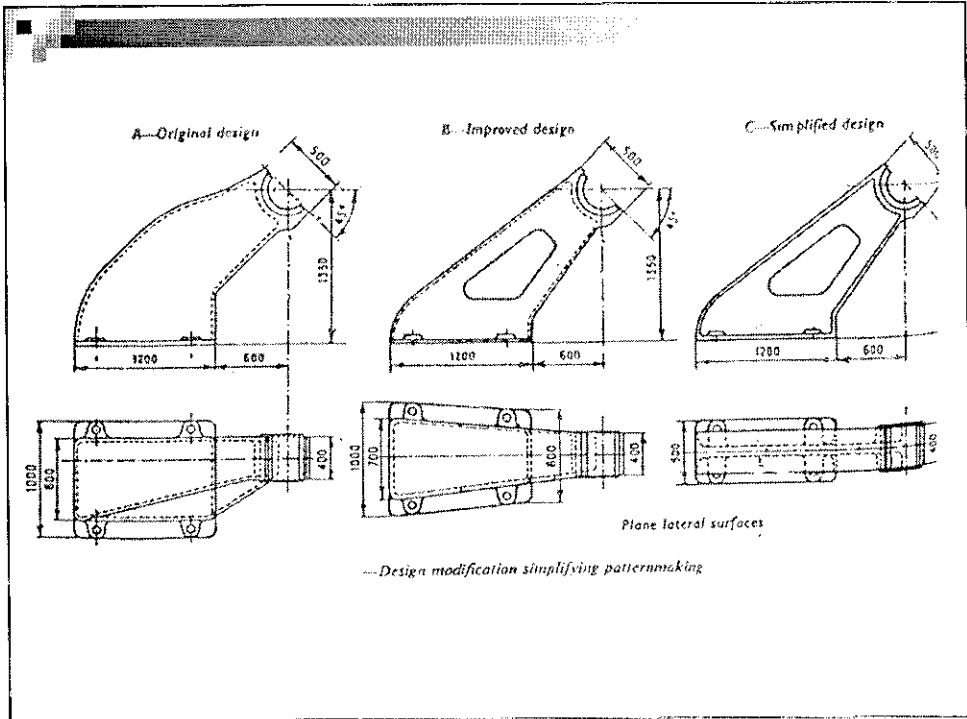


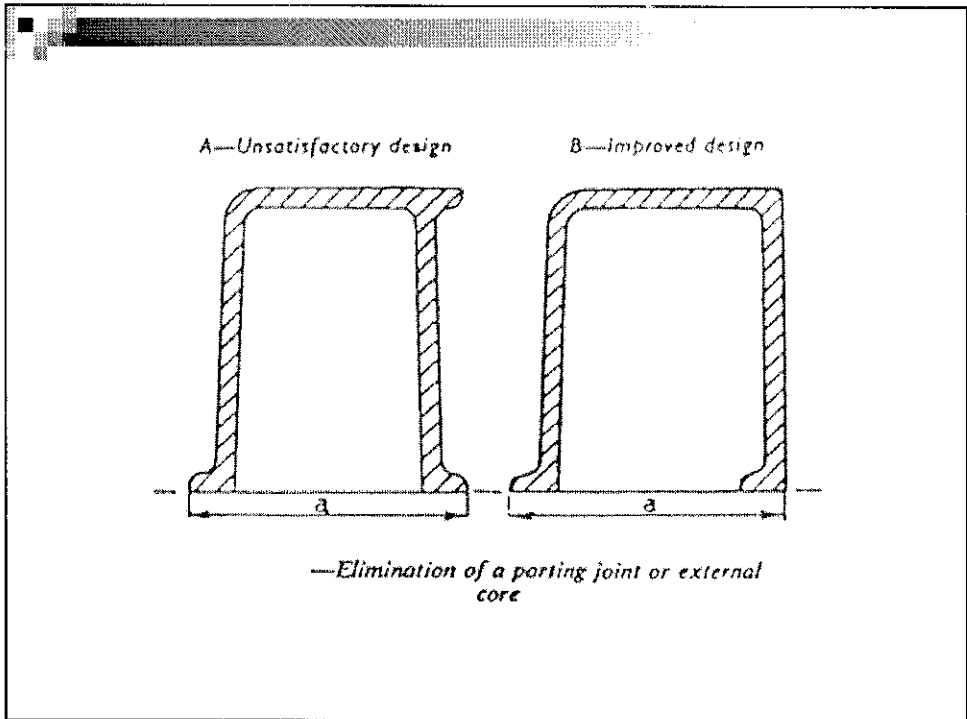
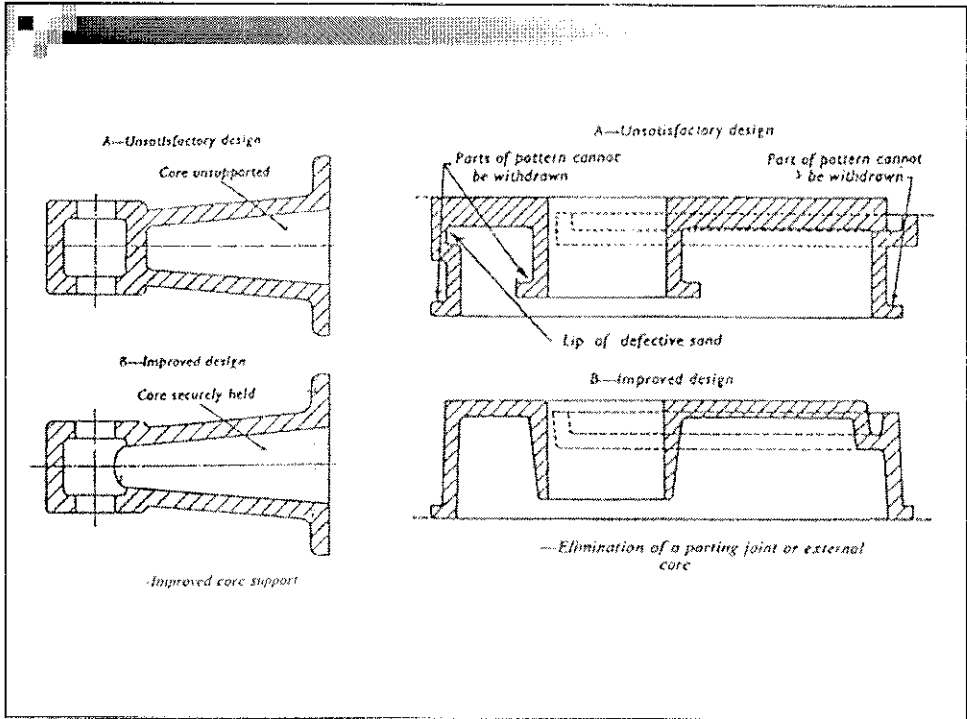












## บทที่ 15 Finishing Processes

### Finishing Processes

- การรื้อแบบงานหล่อ
- การตัดทางเดินโลหะและไรเซอร์
- การทำความสะอาดผิวงานหล่อ
- การอบชุบงานหล่อด้วยความร้อน



### การรื้อแบบงานหล่อ

- ถ้าเป็นขนาดเล็กหรือขนาดกลางจะใช้ Vibrating table
- การสั่นจะทำให้ทรายแตกและหลุดออกจากชิ้นงานหล่อ
- ถ้าเป็นงานขนาดใหญ่จะใช้ Pneumatic Chisel หรือเครื่องกระทุ้งลม
- การกำจัดทรายคอร์อาจทำได้โดยวิธี Electro-Hydraulic Sparking หรือ High Pressure Water Jet

### การตัดทางเดินโลหะและไรเซอ์

- Flogging
- Mechanical Cut Off
- Oxy-Acetylene Cutting
- Air-Carbon Arc Torch Cutting
- Plasma Torch Cutting

## Flogging

- ส่วนใหญ่ใช้กับโลหะที่เปราะ เช่น เหล็กหล่อสีเทา เหล็กหล่อสีขาว
- ใช้หินเจียรระไนทำรอยบากเล็กน้อยก่อน จึงตีด้วยค้อน
- สำหรับเหล็กกล้าหรือเหล็กหล่อเหนียว อาจใช้การตีหักได้เฉพาะทางเดินโลหะที่มีพื้นที่หน้าตัดน้อย ๆ แต่ถ้ามีขนาดใหญ่อาจใช้วิธีอื่น

## Mechanical Cut Off

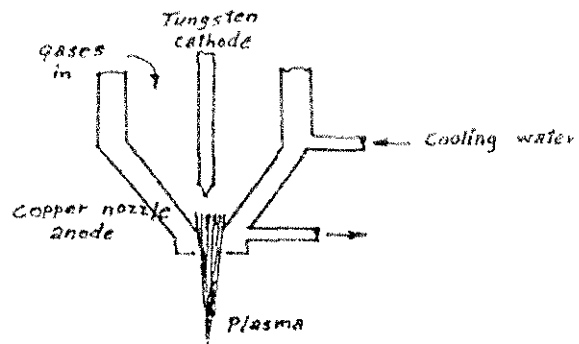
- เหมาะสำหรับใช้ตัดทางเดินโลหะที่มีขนาดเล็กเช่นกัน
- มีหลายวิธีเช่น Band Saw, Shearing Machine, Abrasive Cut Off

## Oxy-Acetylene Cutting

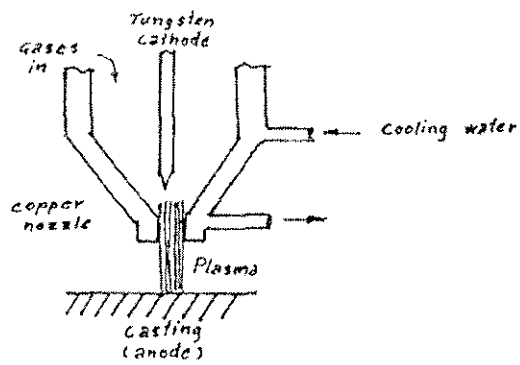
- เป่าแก๊ส Oxygen และ Acetylene ไปยังชิ้นงานที่ถูกเผาให้ร้อน ทำให้เกิดปฏิกิริยา Oxidation เกิด Slag และความร้อน ทำให้ทางเดินโลหะขาดออกได้
- สำหรับโลหะที่มีความต้านทานการเกิด Oxidation มาก เช่น เหล็กกล้าไร้สนิม จะตัดได้ลำบาก อาจต้องใช้ผงเหล็กช่วย เรียกว่า "Powder Cutting"
- วิธีการนี้มีข้อเสียเปรียบคือทำให้เกิด slag ชิ้นที่ผิวชิ้นงานต้องไปทำความสะอาดในภายหลัง

## Plasma Torch Cutting

- มี 2 แบบ คือ
  - Non-Transferred Arc Plasma
  - Transferred Arc Plasma
- เกิดความร้อนจาก Ionization ของแก๊ส สูงถึง 10,000 – 15,000 องศาเซลเซียส
- ควบคุมความแหลมของปลายเปลว Plasma ได้ จึงสามารถตัดได้สะอาด
- ไม่มีกาเกิด Slag ผิวชิ้นงานสะอาด



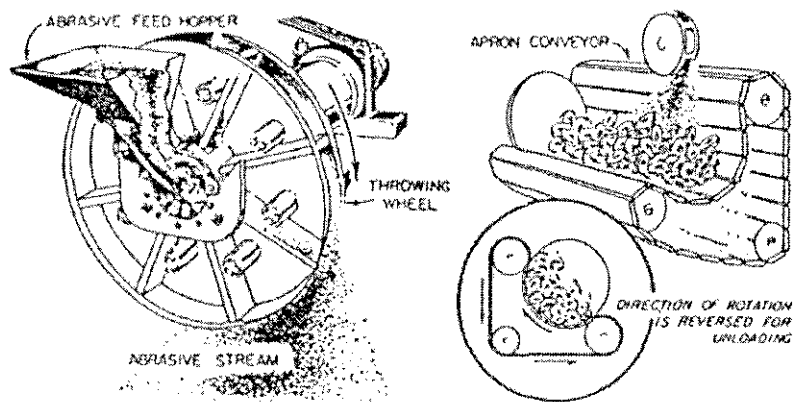
Non-Transferred-Arc Plasma



Transferred-Arc Plasma

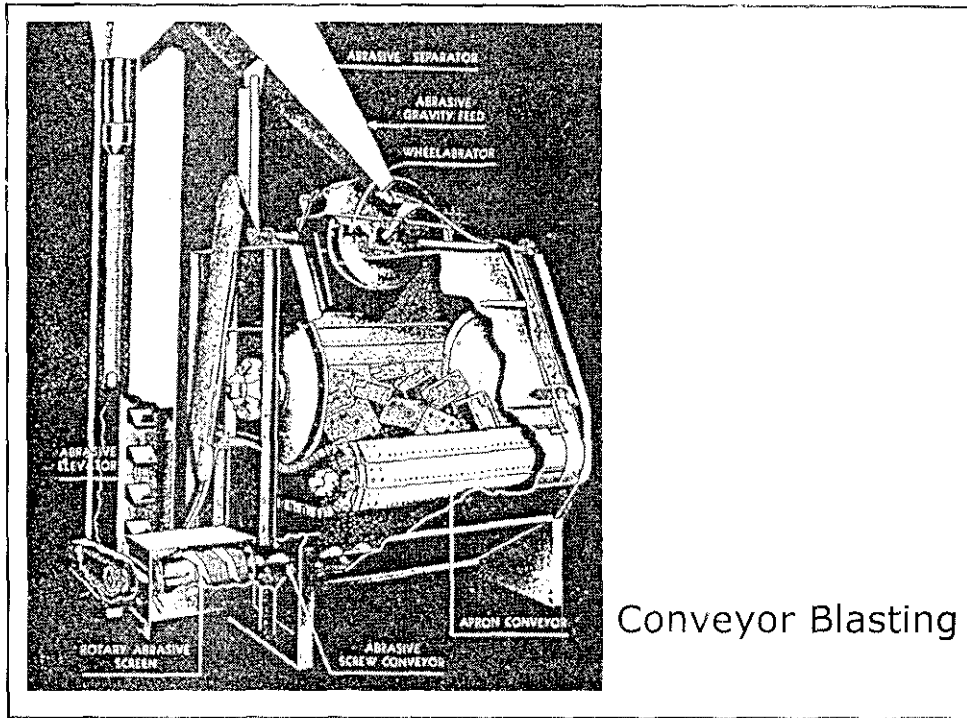
## การทำความสะอาดผิวงานหล่อ

- Wire Brushing
- Tumbling
- Sand Blasting
- Grinding



Mechanical blast cleaning (Wheelabrator system).

Blasting



Conveyor Blasting

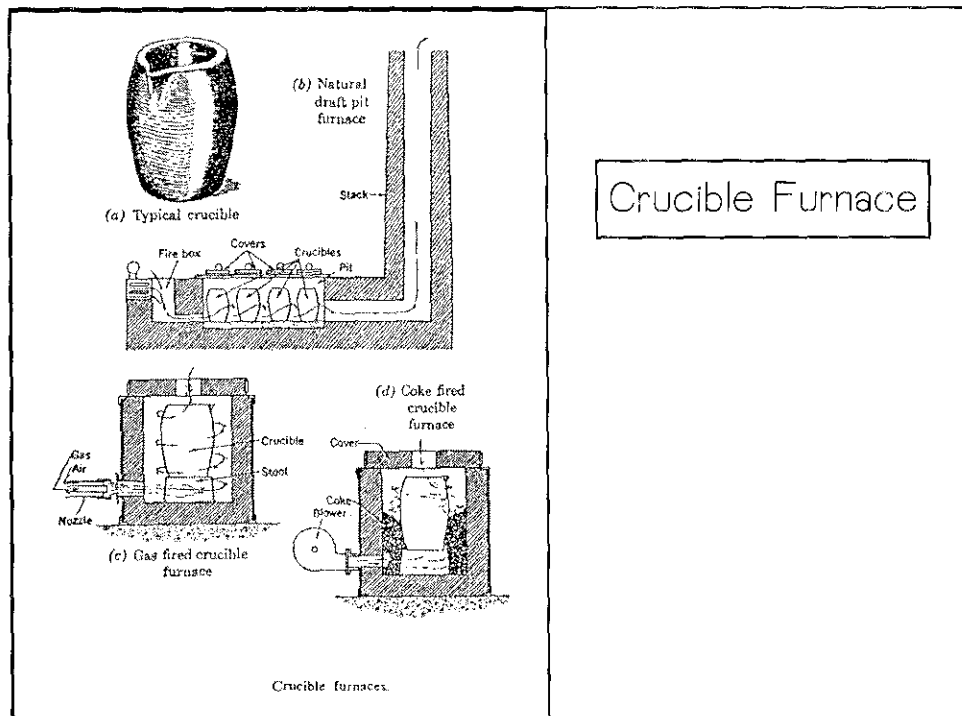
## บทที่ 16 เตาหลอมโลหะ

### เตาหลอมโลหะ

- Crucible Furnace
- Arc Furnace
- Induction Furnace
- Open-hearth Furnace

## Crucible Furnace

- ต้นทุนต่ำ
- อัตราการหลอมช้า
- ต้องทำเป็นครั้ง ๆ ไม่ต่อเนื่อง
- มลพิษสูง



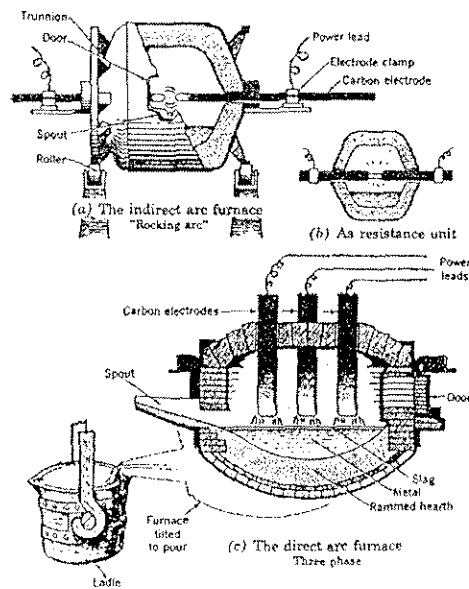
## Crucible Furnace



## Arc Furnace

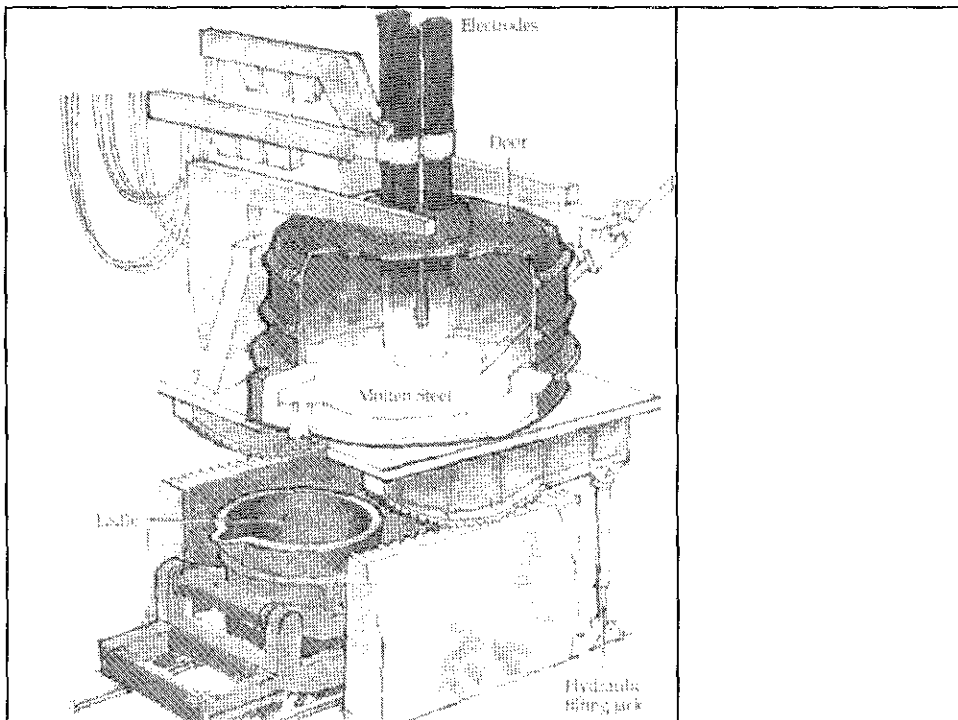
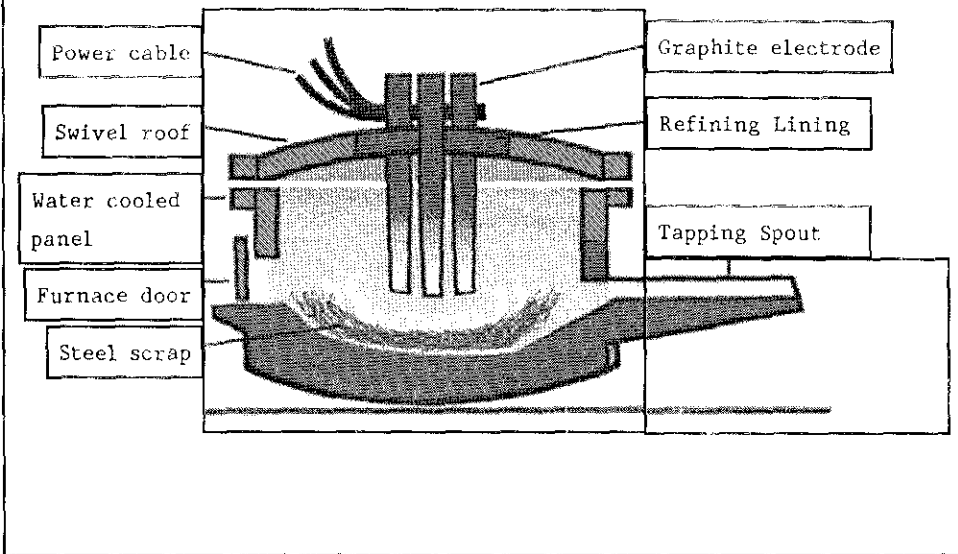
- ควบคุมบรรยากาศได้
- สูญเสียโลหะน้อย
- ควบคุมอุณหภูมิได้ง่าย
- มลพิษทางอากาศน้อย แต่เสียงดัง

## Arc Furnace



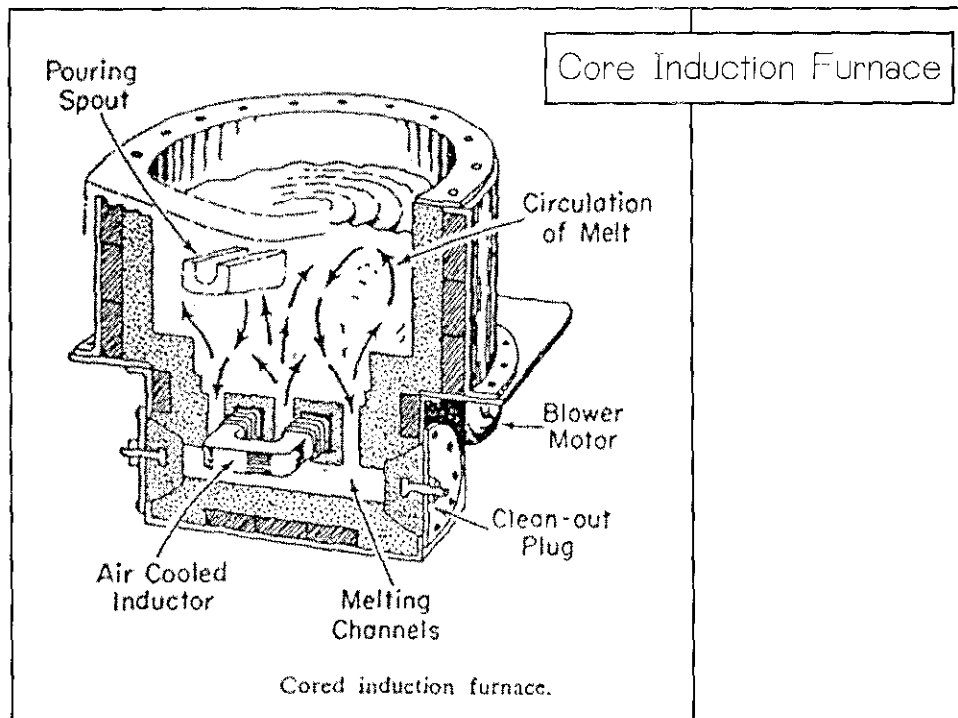
Electric-arc furnaces.

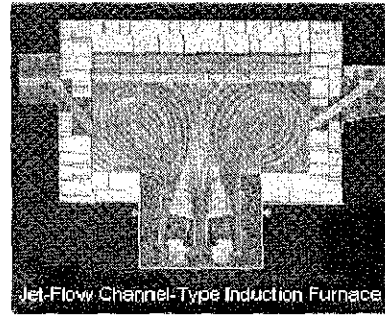
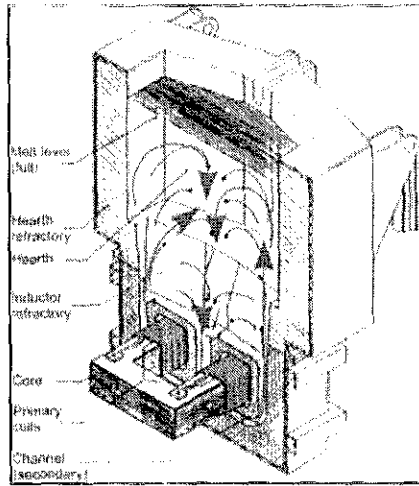
# Electric Arc Furnace



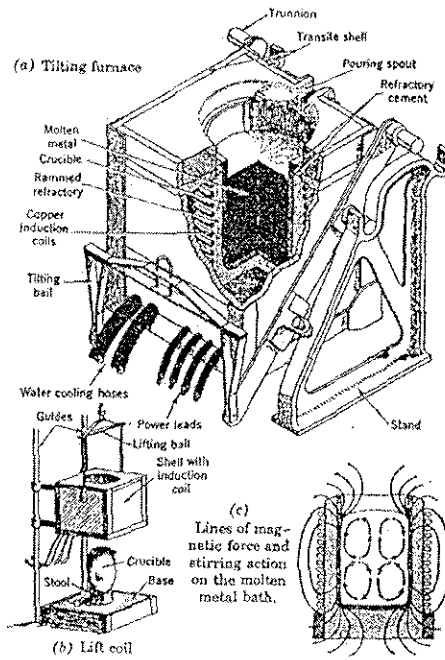
## Induction Furnace

- ควบคุมส่วนผสมทางเคมีได้ค่อนข้างแน่นอนและสม่ำเสมอ
- สูญเสียโลหะน้อยมาก
- ควบคุมอุณหภูมิได้แน่นอน
- มลพิษน้อย
- ต้นทุนสูง
- Slag ทำปฏิกิริยากับโลหะหลอมเหลวได้น้อยกว่า Arc Furnace

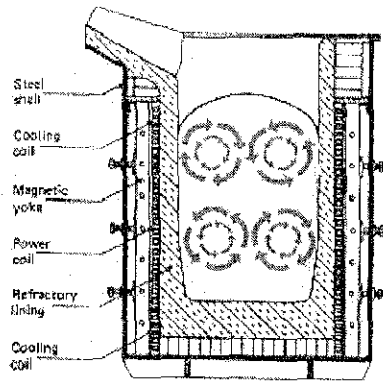




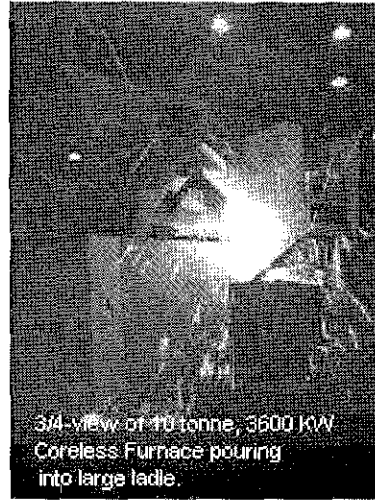
## Coreless Induction Furnace



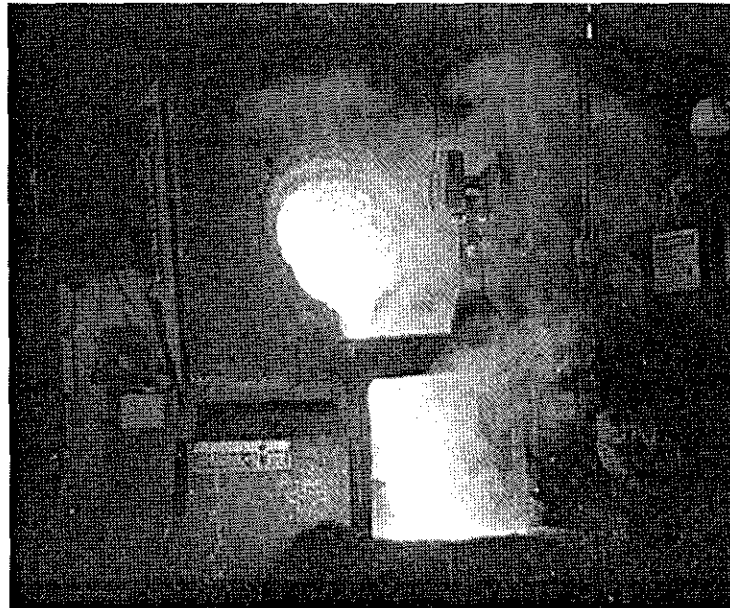
Coreless induction furnaces.



Large Coreless-Induction Furnace. We use heavy-wall extruded copper for free-standing strength and rigidity.



3/4-view of 10 tonne, 3600 kW Coreless Furnace pouring into large ladle.



## Open-hearth Furnace

- เหมาะสำหรับการหลอมจำนวนมากต่อเนื่องหรืองานหล่อขนาดใหญ่
- มีมลพิษสูง
- ประหยัดพลังงาน
- ต้นทุนสูงมาก
- ความคุมอุณหภูมิและส่วนผสมได้ยาก

